

工學博士 學位論文

선체 가속도를 이용한

항해안전성 평가시스템 개발

Development of the Navigation Safety  
Evaluation System with Hull Acceleration

指導教授 孔 吉 永

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

運航시스템工學科

金 昞 辰

本 論文을 金昞辰의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長 地球環境科學博士 薛 東 一



委 員 工學博士 李 忠 魯



委 員 工學博士 宋 在 旭



委 員 工學博士 金 喆 承



委 員 工學博士 孔 吉 永



2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

# 목 차

Abstract .....	viii
Nomenclature .....	xi
<b>제 1 장 서 론</b> .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 관련 연구 동향 .....	3
1.3 논문의 구성 .....	7
<b>제 2 장 선체가속도를 이용한 항해안전성 평가</b> .....	9
2.1 파랑 중의 선체 운동과 운항 시스템 .....	9
2.2 자연적 감속량의 계산 .....	13
2.3 내항성능 평가요소 .....	18
2.3.1 해양파 스펙트럼 .....	18
2.3.2 내항성능 평가요소와 그 시스템적 결합 .....	20
2.3.3 내항성능 평가요소의 분산치 .....	22
2.3.4 내항성능 평가요소의 발생확률 및 한계표준편차 .....	23
2.4 내항성능 평가치와 위험도 .....	24
2.4.1 평가치 .....	25
2.4.2 위험도 .....	25
2.4.3 최대 위험도와 상대 위험도 .....	26
2.5 상하가속도 계측에 의한 항해안전성 평가 .....	27
2.5.1 내항성능 평가요소의 변환 평가치 .....	28
2.5.2 내항성능지표의 정의 .....	30
2.5.3 임의의 한 개 요소에 의한 항해안전성 평가 .....	32
2.5.4 상하가속도 계측에 의한 항해안전성 평가 .....	33

<b>제 3 장 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템</b>	43
3.1 시스템의 구성	43
3.2 선체 상하가속도 계측장치	45
3.3 선박 내항성능 계산 프로그램 및 항해안전성 평가 화상처리	48
 <b>제 4 장 실선 계측을 통한 항해안전성 평가</b>	57
4.1 선체 상하가속도 계측 실선실험	57
4.1.1 실험 개요	57
4.1.2 계측 방법	61
4.1.3 실험 결과	66
4.2 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템 실선실험	81
4.2.1 실험 개요	81
4.2.2 계측 방법	83
4.2.3 실험 결과	85
 <b>제 5 장 결 론</b>	119
 <b>참 고 문 헌</b>	121
 <b>【부록】</b>	127

## 그 림 목 차

Fig. 1-1 Improved design and safe operation of ships .....	4
Fig. 2-1 Coordinate system .....	10
Fig. 2-2 Block diagram of ship operation system .....	11
Fig. 2-3 Involuntary speed loss of container ship in a seaway( $F_n=0.2$ ) .....	16
Fig. 2-4 Involuntary speed loss of container ship in a seaway( $F_n=0.275$ ) .....	16
Fig. 2-5 Involuntary speed loss of passenger ship in a seaway( $F_n=0.2$ ) .....	17
Fig. 2-6 Involuntary speed loss of passenger ship in a seaway( $F_n=0.275$ ) .....	17
Fig. 2-7 Serial combination of factors for evaluating seakeeping performance .....	20
Fig. 2-8 Seakeeping performance index of container ship (sea state 8, $F_n=0.2$ ) .....	36
Fig. 2-9 Seakeeping performance index of container ship (sea state 8, $F_n=0.275$ ) .....	36
Fig. 2-10 Seakeeping performance index of passenger ship (sea state 8, $F_n=0.2$ ) .....	37
Fig. 2-11 Seakeeping performance index of passenger ship (sea state 8, $F_n=0.275$ ) .....	37
Fig. 2-12 Seakeeping performance index of pure car carrier (sea state 8, $F_n=0.2$ ) .....	38
Fig. 2-13 Seakeeping performance index of pure car carrier (sea state 8, $F_n=0.275$ ) .....	38
Fig. 2-14 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	39
Fig. 2-15 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	39

Fig. 2-16 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	40
Fig. 2-17 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	40
Fig. 2-18 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	41
Fig. 2-19 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	41
Fig. 2-20 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	42
Fig. 2-21 Seakeeping performance index of bulk carrier (sea state, ship speed, loading condition) .....	42
Fig. 3-1 Flow chart of the measurement and analysis system .....	45
Fig. 3-2 Internal apparatus of the vertical acceleration measuring system	46
Fig. 3-3 Display for the input signal of vertical acceleration .....	49
Fig. 3-4 Display for the input of ship and sea condition .....	49
Fig. 3-5 Flow chart for explanation of navigational safety evaluation .....	50
Fig. 3-6 Flow chart for explanation of calculation subroutine of vertical acceleration .....	52
Fig. 3-7 Flow chart for explanation of calculation subroutine of relative dangerousness .....	53
Fig. 3-8 Display for the evaluation diagram of navigation safety .....	54
Fig. 3-9 Display for the SPI passage chart .....	55
Fig. 3-10 Display for the navigation safety evaluation system .....	56
Fig. 4-1 Lines of T/S 'HANARA' .....	58
Fig. 4-2 Accelerometer principle .....	60
Fig. 4-3 Time series data of vertical acceleration .....	69
Fig. 4-4 Time series data of vertical acceleration .....	70
Fig. 4-5 Time series data of vertical acceleration .....	71
Fig. 4-6 Time series data of vertical acceleration .....	72
Fig. 4-7 Time series data of vertical acceleration .....	73
Fig. 4-8 Time series data of vertical acceleration .....	74
Fig. 4-9 Time series data of vertical acceleration .....	75

Fig. 4-10	Time series data of vertical acceleration .....	76
Fig. 4-11	Time series data of vertical acceleration .....	77
Fig. 4-12	Time series data of vertical acceleration .....	78
Fig. 4-13	Time series data of vertical acceleration .....	79
Fig. 4-14	Time series data of vertical acceleration .....	80
Fig. 4-15	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	88
Fig. 4-16	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	89
Fig. 4-17	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	90
Fig. 4-18	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	91
Fig. 4-19	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	92
Fig. 4-20	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	93
Fig. 4-21	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	94
Fig. 4-22	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	95
Fig. 4-23	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )] .....	96
Fig. 4-24	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( II )] .....	97
Fig. 4-25	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( II )] .....	98
Fig. 4-26	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( II )] .....	99
Fig. 4-27	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( II )] .....	100
Fig. 4-28	Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( II )] .....	101

Fig. 4-29 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	102
Fig. 4-30 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	103
Fig. 4-31 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	104
Fig. 4-32 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	105
Fig. 4-33 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	106
Fig. 4-34 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	107
Fig. 4-35 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	108
Fig. 5-36 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	109
Fig. 4-37 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	110
Fig. 4-38 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	111
Fig. 4-39 Time series data of vertical acceleration	
[evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]	112
Fig. 4-40 Time series data measured by evaluation system of navigation	
safety(Ⅱ) [not filtering for low frequency band]	113
Fig. 4-41 Time series data measured by evaluation system of navigation	
safety(Ⅱ) [filtering for low frequency band]	114
Fig. 4-42 Passage chart of navigation safety evaluation system(Ⅰ)	115
Fig. 4-43 Passage chart of navigation safety evaluation system(Ⅱ)	116
Fig. 4-44 Navigation safety evaluation system(Ⅰ)	117
Fig. 4-45 Navigation safety evaluation system(Ⅱ)	118



## 표 목 차

Table 2-1 Factors presently adopted for evaluating seakeeping performance and their critical values .....	21
Table 4-1 Principal particulars of T/S 'HANARA' .....	58
Table 4-2 Seagoing navigation schedule of T/S 'HANARA' .....	59
Table 4-3 Principal Specifications of the Accelerometer( I ) .....	60
Table 4-4 Principal articles with measuring vertical acceleration .....	61
Table 4-5 Coastal navigation schedule of T/S 'HANARA' .....	81
Table 4-6 Principal Specifications of the Accelerometer( II ) .....	82
Table 4-7 Principal articles at onboard test of evaluation system of navigation safety( I ) .....	83
Table 4-8 Principal articles at onboard test of evaluation system of navigation safety( II ) .....	84

# Development of the Navigation Safety Evaluation System with Hull Acceleration

Byeong-Jin Kim

Department of Ship Operation System Engineering,  
Graduate School of Korea Maritime University

## ABSTRACT

Recently the automated vessel requires the system which could evaluate the navigation safety of a ship in the present position and the future position estimated from weather information as well as recommend the optimum course and speed for the ship's safety. From the viewpoint of safe operation, it is primarily important to estimate the seakeeping performance of a ship in a seaway. Among various factors for evaluating it, ship motion is the most fundamental one. According to recent studies, deck wetness, propeller racing, slamming, rolling, vertical and lateral acceleration are the factors to evaluate seakeeping performance.

The systemic combination of those evaluated factors has the form of serial combination. A theory of reliability engineering is applied to the theoretical method which makes it possible to evaluate the seakeeping performance. The occurrence probability by Rayleigh's joint probability density function of the factors has been adopted for evaluating seakeeping performance. If the probability of occurrence of just one factor exceeds the critical occurrence probability, then the overall seakeeping performance fails and the ship may be endangered.

The Seakeeping Performance Index (SPI) is defined by measuring only any one factor, i.e. vertical acceleration, through the medium of relative dangerousness of the other factors. If one factor exceeds each extreme value or some factors come close to the extreme value, SPI would exceed '1' which is calculated from the occurrence probability. Namely, it means that the ship will face dangerous circumstance.

In this study, we compute the response amplitude of ship motions with the weather data provided in real time, and then obtain the involuntary speed loss with added resistance caused by wave and ship motion. Finally, numerical calculation is executed by stochastic process of the seakeeping performance elements.

After calculation above process, the results have been achieved to develop the system which can evaluate the synthetic seakeeping performance of a ship using the measured data of hull vertical acceleration.

The system is composed of the apparatus for measuring the vertical acceleration generated by the ship's motions, computer for calculating the synthetic seakeeping performance index and monitor for displaying the evaluating diagram of navigational safety of ship.

In order to apply this system in actual operation ship, computer simulation is conducted, and the results are compared with the products based on real ship operation. A Lpp 93m passenger ship, which is equipped with a single screw and diesel engine, is used to test this system on the seagoing vessel.

Therefore the results of this study for developing the navigation evaluation system with hull acceleration could be summarized as follows.

In order to evaluate the ship navigation safety in rough seaway, the

onboard navigation safety evaluation system has been developed. This apparatus is used for measuring the vertical acceleration generated by ship's motion. This system is able to synthetically evaluate the navigational safety of a ship with one element of the data of vertical acceleration which is measured by accelerometer regardless of vessel's type or loading condition.

The results obtained by this evaluation system have appeared on a monitor for these operator's convenience using real time weather data. These results will be useful for the ship operators who are concerned about the optimum course and speed for safety of ships.

The results of this study are useful for application to design an automated vessel and develop the next generation voyage data recorder of a ship.

## Nomenclature

$\widetilde{E}_i$	: 내항성능 평가요소의 변환 평가치
$\widetilde{E}_T$	: 선박 시스템의 내항성능 변환 평가치
$E_{Tc}$	: 선박 시스템의 내항성능 한계 평가치
$E_{X_i}$	: 내항성능 평가요소의 평가치
$E_{X_{ic}}$	: 내항성능 평가요소의 한계 평가치
$Fn$	: Froude Number ( $= \frac{V}{\sqrt{gL}}$ )
$g$	: 중력 가속도
$H_{X_i}(\omega, V, \chi - \theta)$	: 내항성능 평가요소의 응답 함수
$L_{pp}$	: 수선간장
$N_e$	: 주기관의 회전수
$N_p$	: 프로펠러 회전수
$P_i$	: 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수
$P_T$	: 내항성능 신뢰도 함수
$Q_{X_{ic}}$	: 내항성능 평가요소의 한계발생확률
$Q(X_i)$	: 내항성능 평가요소의 발생 확률
$Q(t)$	: 내항성능 평가요소인 현상이 최저 1회 발생할 확률
$Q_e$	: 주기관의 토크
$Q_p$	: 프로펠러 토크
$q(X_i)$	: Rayleigh 분포의 1차원 확률밀도함수
$R$	: 선체 저항
$r$	: 주기관과 프로펠러의 회전수 비
$S$	: 해상 상태

$SPI$	: 내항성능지표
$S_{X_i}(\omega, X)$	: 내항성능 평가요소의 스펙트럼
$S_{\zeta}(\omega)$	: 장파정 해양파 스펙트럼
$S_{\zeta}(\omega, \theta)$	: 단파정 해양파 스펙트럼
$T_P$	: 프로펠러 추력
$t$	: 추력 감소 계수
$U$	: 프로펠러 유입 속도
$V$	: 선박의 속도
$X_i$	: 내항성능 평가요소
$X_{iC}$	: 내항성능 평가요소의 한계치
$X_i(t)$	: 내항성능 평가요소의 확률 과정
$w$	: 반류 계수
$\Delta R$	: 선체 저항 증가량
$\Delta V$	: 자연적 감속량
$n_t$	: 전달 계수
$n_R$	: 프로펠러 효율비
$\Lambda$	: 주기관의 1회전당 연료 주입량
$\sigma_{X_i}$	: 내항성능 평가요소의 표준 편차
$\sigma_{X_i}^2$	: 내항성능 평가요소의 분산치
$\mu_m$	: 내항성능 평가요소의 최대 위험도
$\mu_{X_i}$	: 내항성능 평가요소의 위험도
$\omega$	: 해양파 주파수
$X$	: 선박과 파와의 만남각

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

최근에 운항 및 건조중인 선박들은 대형화, 지능화 및 고속화되어가고 있으며, 과학 기술의 발전에 따른 전자·통신 장비의 개발로 조선·항해 분야에 많은 자동화 기술들이 자리를 잡아가고 있다. ARPA 레이더, GPS, 전자해도 등의 항해계기를 이용함으로써 선박운항자는 타 선박과의 충돌 및 좌초 등의 해양사고 발생 가능성을 미리 예측할 수 있고, 이를 통하여 해양사고 발생 위험성을 경감시킬 수 있게 되었다. 따라서 선박의 운항 자동화 기술은 그 신뢰성이 점점 높아지고, 선박의 안전성 확보와 경제성 향상 및 환경 피해를 방지함에도 크게 이바지 하고 있다.[1]

IMO(International Maritime Organization)는 선박의 안전운항을 위하여 STCW 78/95 협약의 부속서 규정에 관한 강제 기준인 STCW CODE A 제Ⅱ장 제A-Ⅱ/2조의 ‘총톤수 500톤 이상의 선박의 선장과 1등항해사에 대한 해기능력의 최저기준명세서’에서 항해계획에 관하여 ‘인정된 대양항적 플로팅 방법에 의한 항해계획과 항행시 기상조건을 고려’하도록 규정하고 있다. 또한 선장과 1등항해사에 대한 능력평가의 기준으로서 ‘항해계획의 근거가 관련자료 및 서지류에서 수집한 사실과 통계적 자료에 의하여 뒷받침 될 것’과 ‘항해의 위험을 정확히 인식할 것’ 등이 규정되어 있다.[2-3]

그러나 실제의 거친 해상을 항해하고 있는 선박에서 바람과 파랑 등의 외력으로 인해 위험 현상이 발생하는 경우, 선장 등 선박운항자가 당시의 선박 상태와 침로 및 속력 그리고 기상·해상 상태에 따른 항해안전성과 그 위험도를

정량적으로 분석·평가할 수 없는 것이 현실이다. 황천시의 안전 항해 대책에 관한 조사에 의하면 피항 조선의 주요한 방법은 감속과 변침을 동시에 행하는 방법이 가장 많고, 다음으로 감속, 변침의 순서로 피항조치를 취하며, 이러한 조치는 선박운항자들의 감각적이고 경험적인 주관적 견해를 토대로 실시되고 있는 것으로 나타나 있다.[4]

따라서 차세대 자동화 선박에서는 어떤 해상을 항해함에 있어 어느 정도의 운항 속도로 항행해야 하는 것인가와 종합적인 항해안전성이 어느 정도인가를 판단함에 있어서 인간의 경험보다 전문가 시스템을 이용한 정량적인 평가에 의한 객관적인 방법이 요구된다.

파랑 중을 항해하는 선박의 항해안전성을 평가하는 일반적인 방법은 내항성능(Seakeeping Performance) 평가를 이용하는 것이다. 내항성능은 ‘어떤 사명을 부여받은 선박이 예정된 취항 항로 혹은 해역을 항해함에 있어, 해상 조건에 관계없이 승무원의 안전은 물론이고 선체에 탑재된 장비, 설비 등의 기능 및 성능의 저하 없이, 그 사명을 수행하는데 요구되는 성능’으로 정의된다. 이 정의에 따르면 내항성능은 파랑 중 선박 고유의 성능만을 말하는 것이 아니고, 승무원-선체 및 탑재기기(항해 장비, 추진 기관)로 된 인간-기계 시스템(Man-machine system)으로서의 선박의 파랑 중 성능을 말한다. 따라서 선박의 내항성능 평가는 승무원, 선체, 탑재 기기가 유기적으로 결합해서, 파랑 중을 항행하는 선박 시스템에서 바람, 파랑 등에 의해 선박의 선체-추진기-주기관 서브시스템의 기능과 성능이 어떻게 영향을 받는가를 평가하는 것이다.[5-11]

파랑 중 선박의 항해안전성을 정량적으로 평가하는 대표적인 방법으로는 선속 감소에 관한 추진 성능을 포함한 내항성능과 신뢰성 공학 기법을 이용한 전문가 시스템을 도입하여 선박의 항해안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 내항성능지표 (SPI : Synthetic Seakeeping Performance Index)를 들 수 있다.[12]



내항성능지표는, 먼저 이론 계산식을 이용하여 파랑 중을 항해하고 있는 선박의 선체 운동이 원인이 되어 발생하는 기존의 각 내항성능 평가요소에 대한 발생 확률을 계산하고, 내항성능 평가치, 위험도를 계산한다. 그리고 내항성능 평가요소의 위험도가 같은 경우 그 발생 확률도 같다는 신뢰성 공학 이론을 이용하여 선박의 종류, 적재 상태 등에 관계없이 어떠한 운항 상태에서도 선박 전체의 항해안전성을 임의의 편리한 한 개의 내항성능 평가요소만을 계측하여 평가할 수 있는 종합적인 평가 방법이다.

기존의 내항성능 평가요소는 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어져 있기 때문에 선박 전체의 내항성능을 평가하기 위해서는 모든 요소의 계측을 필요로 한다. 그러나 모든 요소에 센서를 설치하여 평가한다는 것은, 계측을 위한 센서의 설치가 불가능한 것도 있고, 경제적인 면에서도 비용의 과다로 인하여 실용화에 많은 문제점을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 내항성능 평가 방법상의 문제점을 개선하고 평가요소 계측상의 어려움을 해결할 수 있는 평가 방법으로, 임의의 대표 요소 한 가지에 의한 선박 전체의 항해안전성 평가 즉, 선박운항자들이 감각적인 면에서 정량화된 평가요소로 채택하기 쉬운 상하가속도만을 계측하여 선박의 종합적인 내항성능을 평가할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다.

## 1.2 관련 연구 동향

선박의 파랑 중 성능 평가를 위한 내항성능에 관한 연구는 선체 운동, 추진 성능, 신뢰성 공학 등이 적용되면서 정량적으로 평가하는 연구로 Fig. 1-1에 나타난 바와 같이 실제 해상에서 사람과 대량의 화물을 안전하고 경제적이며 고

속으로 운송 가능한 선박을 개발, 설계, 건조하여 운항이 가능하도록 요구되어지고 있다.

이런 요구에 대해 내항성능 연구는 파랑 중에서의 선체 응답의 계산수법의 연구를 중심 과제로 해서 Strip method, Unified theory, Enhanced unified theory, 3D Panel method, Rankin panel method 등이 개발되어, 실용단계까지 파랑 중에서의 선체 응답 계산이 가능하게 되었다. 또한 선체운동이나 파랑 하중의 단기 예측이나 장기 예측법에 관한 연구가 진행되어 선박의 구조설계에 이용되고 있으며[13-20], 파랑에 의한 선박의 대진폭운동과 같은 비선형요소들에 대한 연구가 여러 실험과 계산을 통하여 실시되었다.[21-27]

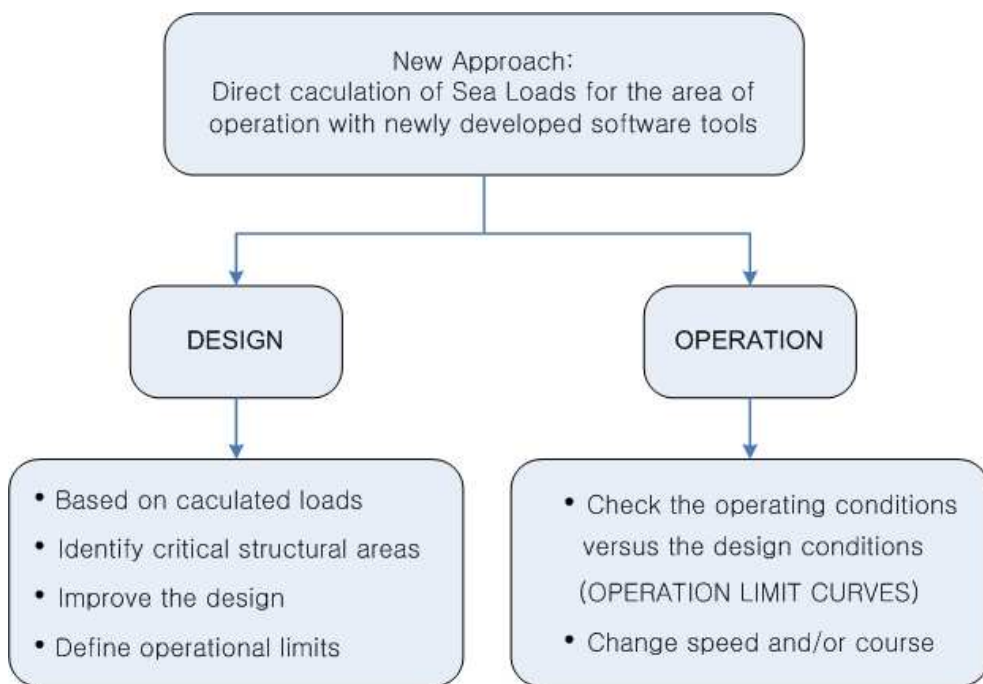


Fig. 2-1 Improved design and safe operation of ships

그리고 선박의 항해계기 및 위성통신기술의 급속한 발전에 따라 1980년대 후반 부터는 선박의 안전운항을 위한 항행지원·항로계획지원 시스템의 개발이 이루

어졌고, 선체 상태 감시시스템으로서 선체 및 국부강도 모니터링 시스템과 선박탑재형 안전운항지원 시스템 등의 개발이 시도되었다. 또한 이들 선체운동 자동계측기록 시스템을 이용해서 선박의 조우 해상과 선체운동의 실태 및 파랑 중에 있어서 조선 판단에 관한 실증적인 연구 등도 활발하게 진행되었다.

파랑 중을 항해하는 선박의 운동 상태를 계산하는 연구는 1950년대 K. Kroukovsky가 파랑 중 선박의 운동 계산에 Strip method을 도입하면서 시작되었다. 그 후 Ursel-Tasai가 2차원 물체에 작용하는 상하요 유체력의 이론적 해법을 개발하면서 선수와 중의 선체운동 계산이 가능하게 되었다. 이후 6자유도 운동에 관한 이론 계산이 가능해지고, 이들 계산에 고성능 컴퓨터가 도입되면서 그 추정 정도가 대단히 높아졌다. 본 연구에서는 Takagi-Tasai에 의해 개발된 이론을 적용한 NSM(New Strip Method)을 이용하여 선체 운동을 계산한다.[28-30]

위에서 밝힌 선체 운동 계산은 선박의 항해안전성 평가에 가장 기본적인 요소이며, 이 계산에 선박의 속도 손실(Speed loss)을 고려하는 것도 대단히 중요하다. 파랑 중을 항해하는 선박의 속도 손실에는 선체 동요, 바람, 파랑 등이 원인이 되어 발생하는 저항 증가, 프로펠러 노출 등으로 인한 추진 효율 감소로 자연적으로 발생하는 자연적 감속 또는 선속 손실(Involuntary speed loss)과 그 상태에서 선박의 동요가 더욱 심해져 대각도 선체 운동, 프로펠러 레이싱, 슬래밍 및 갑판 침수 등이 발생하였을 때 선체, 화물, 승무원의 안전을 위하여 선속이나 침로의 조종에 의해 발생하는 선속 저하로 의식적 감속(Voluntary speed loss)이 있다.

선박이 파랑 중을 항행할 때 선속의 손실이 발생한다는 것은 오래 전부터 잘 알려진 사실이다. 그에 따라 그 추정법도 간단한 것에서부터 여러 종류의 추정법이 소개되어 왔다. 그러나 선박 전체의 입장에서 각종 기능을 총괄하여 자연

적 감속과 의식적 감속을 추정하는 것은 최근의 일이다. 의식적 감속이 선장이 라는 인간이 개재됨으로써 별개의 것으로 취급되었으나, 선박의 항해 안전에 관한 판단을 정량적으로 자동운항시스템에 의해 평가할 수 있다면 같이 취급할 수 있을 것으로 생각된다.[31-34]

특히 파랑 중을 항행하는 선박에서 안전 확보를 위해서는 조선(操船)에 필요한 최소한의 선속(타효 속력)을 유지하는 것은 대단히 중요하다. 따라서 선박 조종에 필요한 최소한의 선속을 확보하기 위해서는 바람, 파랑 및 선체 동요에 의해 발생하는 자연적 감속을 고려하여 적절한 선속을 유지해야 한다. 또한 실제 해상에서 선체 운동을 정확히 계산하기 위해서도 자연적 감속을 고려해야 한다.

선박의 운동이 원인이 되어 발생하는 여러 현상들 중에서 적절한 평가요소를 선정하고 이것들에 한계치와 한계발생확률을 설정하는 방법이 사용되어져 왔다. 그런데 기존 내항성능 평가요소에는 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어져 있다. 따라서 선박 전체의 내항성능을 평가하기 위해서는 모든 요소의 계측을 필요로 하는데 그 요소의 특성상 계측을 위한 센서의 설치가 불가능한 것도 있다. 그리고 평가 시스템에 상관 계수 등 사전에 계산된 많은 양의 데이터베이스 구축이 필요하므로 실시간(Real time) 이용이나 실용상 번거로운 점도 있다. 또한 다른 요소와의 상관관계는 선박 종류와 선형에 따라 다르며, 그 상관성이 극히 작은 경우도 있다. 종·횡동요를 이용하여 평가하는 방법도 평가요소의 한계치를 각도로 정하여 계산해야 하는데, 해상 상태에 따라서 한계 횡요각이 각각 달라서 시스템 구성에 어려움이 있다.[35-39]

### 1.3 논문의 구성

본 연구에서는 선박의 종류, 적재 상태 등에 관계없이 어떠한 운항 상태에서도 선박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있도록 선박에 선체운동 가속도 계측·해석 시스템을 탑재하여 실제 해상에서 선체 가속도를 계측하고, 계측된 데이터를 해석 및 계산을 통하여 선박의 종합적인 항해안전성을 평가할 수 있는 시스템을 개발한다. 실제 해상에서의 기상·해상 정보를 바탕으로 선박운항자가 항해위험도를 모니터 화면이나 레이더 스크린 상에서 시각적으로 쉽게 판단할 수 있도록 하여 운항자가 위험 상태를 벗어나기 위해서 필요로 하는 조치 즉, 변침이나 선속 조정 등에 관한 정량적인 데이터를 제공하고자 한다.

제1장은 서론으로 연구의 목적 및 배경, 관련 연구, 연구 내용과 방법에 관하여 기술하였다.

제2장에서는 풍파 중의 자연적 감속량을 이론식을 이용하여 계산하였다. 컨테이너선과 여객선형을 대상 선박으로 하여 해상 상태별로 선박과 파의 만남각에 따라 자연적 감속량의 수치 시뮬레이션을 행하고 계산 결과를 나타내었다. 그리고 항해안전성 평가의 가장 기본적인 요소인 선체 운동을 추정할 때 이미 계산된 파랑 중의 선속 손실량을 고려한다.

또한, 선체 운동이 원인이 되어 발생하는 기존의 각 내항성능 평가요소에 대한 발생 확률을 계산하고, 내항성능 평가치, 위험도를 정의한다.[40-43] 선박의 항해안전성을 종합적으로 평가할 수 있게 제안 되어진 내항성능지표를 이용하여 컨테이너선, 여객선, 자동차 전용선, 벌크선을 대상 선박으로 수치 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 나타내었다.

제3장에서는 선박에 설치하여 선체 운동에 의하여 발생하는 상하방향의 가속도를 계측하는 상하가속도 계측장치와 내항성능지표를 이용하여 계산을 실시하고 항해안전성 평가 결과를 평가도와 경과도로 화상 처리하여 모니터 공간상에 표시하도록 컴퓨터로 구성되어진 항해안전성 평가시스템의 설계 및 구현에 관하여 기술하였다.

제4장에서는 실선을 사용한 실험으로 계측 간격 및 계측 시간이 상하가속도의 분산치에 미치는 영향을 조사하고, 가장 적합한 것을 선택하기 위한 선체 상하가속도 계측 실험과 본 연구에서 개발한 선체 상하가속도 계측장치와 내항성능지표 계산 프로그램 및 항해안전성 평가 화상처리 프로그램의 정확한 작동상태를 점검하기 위한 항해안전성 평가시스템 시험 등으로 2회에 걸쳐 실시되었으며, 각각의 실선 실험의 개요, 방법 및 결과를 기술하였다.

제5장에서는 이상의 연구 및 계산 결과로부터 얻어진 몇 가지 결론과 추후 연구 과제를 기술하였다.

## 제 2 장 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가

### 2.1 파랑 중의 선체 운동과 운항 시스템

불규칙 파랑 중에서 항해하는 선박의 선체운동 응답치를 해석하기 위해서는 먼저 규칙파에 대한 선체운동의 응답함수가 필요하다. 이러한 규칙파 중에서 선박이 파로부터 받는 힘을 명확히 파악하고, 선체의 여러 가지 운동과 힘을 측정하기 위해서 주로 Strip 이론이 널리 사용되고 있다.

Strip 이론은 선체가 2차원 단면(Strip)을 갖는다고 가정하고, 선체를 여러 개의 Strip으로 나누어 각각의 Strip에 작용하는 2차원 유체력들을 선박의 길이 방향으로 적분함으로써 3차원인 선체에 작용하는 유체력들을 계산하는 방법이다.[44] 본 연구 개발에서는 등속이동공간 좌표계를 기초로 하여 체계화된 NSM(New Strip Method)을 이용하여 선체응답함수를 계산하였다.

그리고, 파랑 중 선체운동 계산을 위한 좌표계는 Fig. 2-1과 같다.

- 즉,
- |                 |                             |
|-----------------|-----------------------------|
| $O'-XYZ$        | : 정지공간 좌표계                  |
| $O_0-x_0y_0z_0$ | : 등속이동 공간 좌표계               |
| $O-xyz$         | : 원점을 정지 자유표면에 놓은 선체 고정 좌표계 |
| $G-x_by_bz_b$   | : 원점을 중심에 놓은 선체 고정 좌표계      |

선박은 파의 진행방향에 대해  $\chi$  각도로 이루어지는 직선상을 속도  $V$ 로서 항해를 하고, 평균위치  $O_0$ 의 주위에서 무게중심  $G$ 가 각각의 축 방향 및 축 주위로 미소 진폭의 동요를 한다고 가정한다. 그리고 위상각은 파정이 선체 중앙의 중심선에 있을 때를 기준으로 하며 위상전진을 (+)로 정한다.

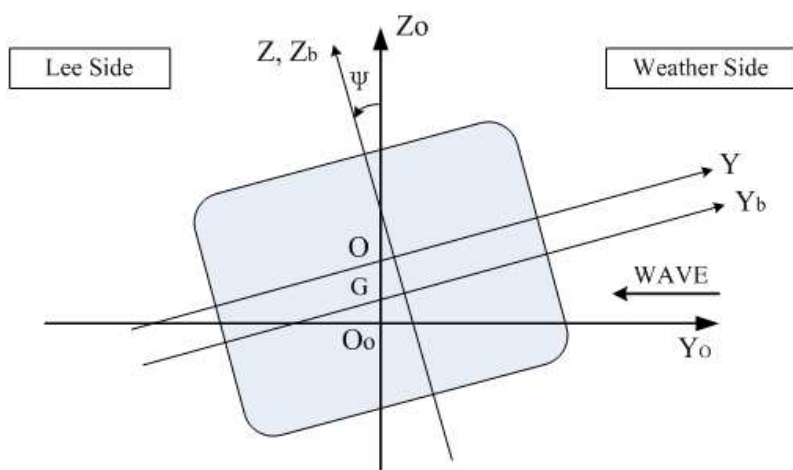
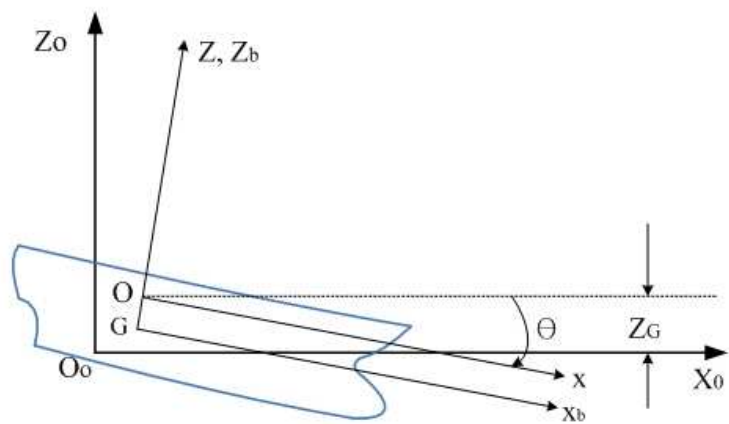
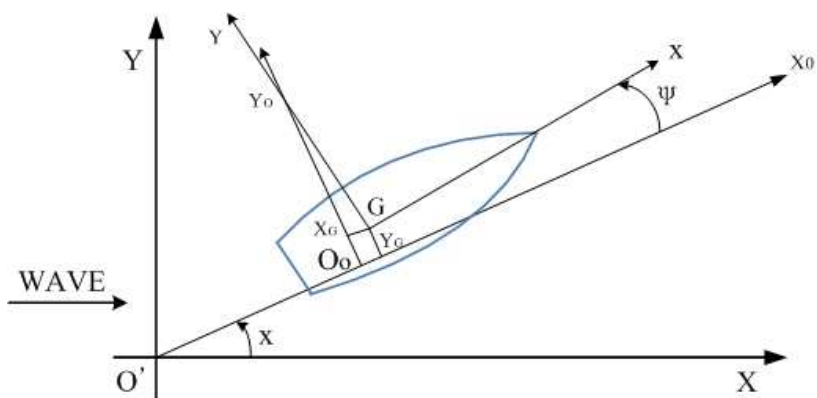


Fig. 2-1 Coordinate system



선박을 구성하고 있는 기능 중 선박 운항 성능과 직접적으로 관계가 있는 요소는 선체, 프로펠러, 주기관, 선박운항자, 타, 조종 시스템이다. 여기서 항행 중 침로를 일정하게 유지하고 있는 상황을 전제로 하면, 선체-프로펠러-주기관-선박운항자가 중요한 역할을 하게 된다. 그런데 차세대 고신뢰도 지능화 선박은 기존 선박에서 선박운항자가 하고 있는 선체, 주기관 및 화물 적재 상태의 파악, 선박의 안전과 위험에 대한 결정, 그 상황에 맞는 적절한 조치 등의 역할을 전문가 시스템인 자동운항시스템(Automatic operation system)이 대신 행한다. 따라서 자동화 선박을 구성하고 있는 주요 기능은 선체-프로펠러-주기관-자동운항시스템이 된다. 자동화 선박 시스템에서 이들 주요 기능의 결합 상태를 나타낸 것이 Fig. 2-2이다.

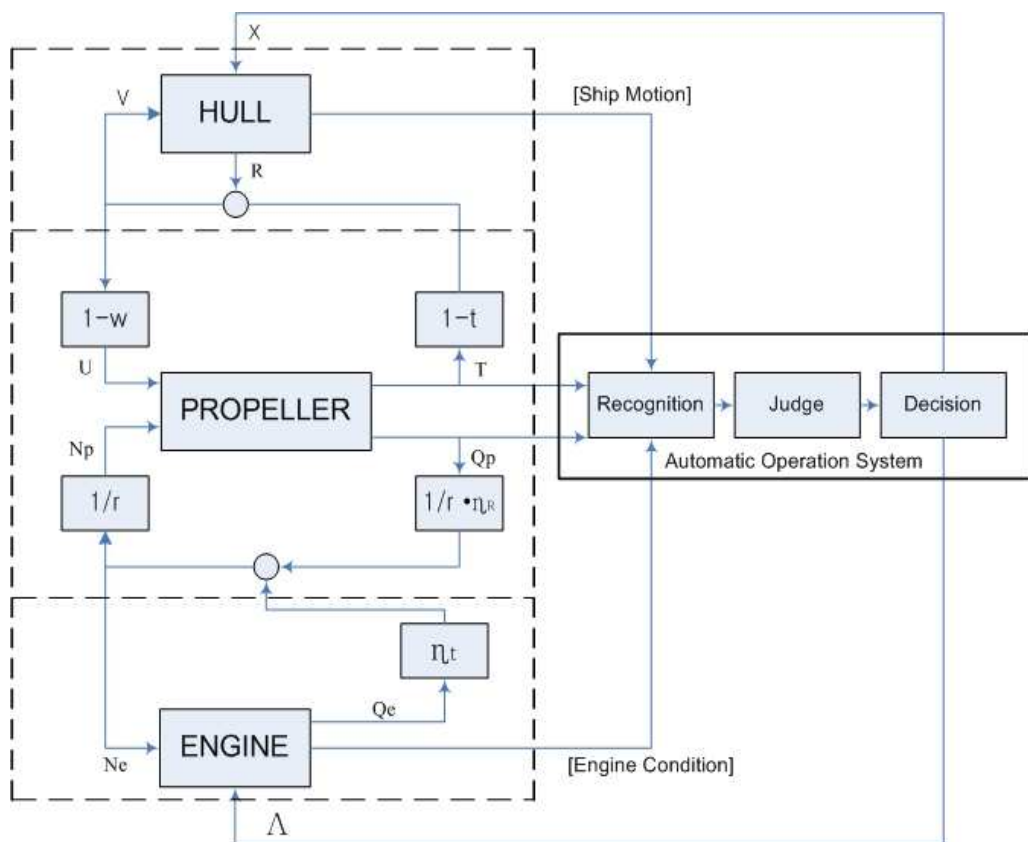


Fig. 2-2 Block diagram of ship operation system

이 그림에는 각 기능의 입·출력 관계, 파라메타의 상호 작용, 각종 경로에 존재하는 계수(효율과 저항 요소) 등의 관계가 표시되어 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 선체와 주기관은 프로펠러를 중심으로 상호 대칭적인 관계에 있다. 이것은 전달기인 프로펠러를 매개로 추진 동력원인 주기관과 부하인 선체가 결합된 것이며, 또한 프로펠러는 주기관의 부하로, 선체의 추진 동력원으로 두 가지 측면의 역할을 동시에 하고 있다. 전체적으로는 자동운항시스템이 주기관, 프로펠러, 선체의 3가지 기능을 통합·제어하고 있는 관계로 되어 있다.

그림 중  $\eta_t$ 는 전달 계수(Transmission coefficient),  $w$ 는 반류 계수(Wake fraction),  $t$ 는 추력 감소 계수(Thrust deduction fraction),  $\eta_R$ 은 프로펠러 효율비(Relative rotative efficiency)를 나타낸다. 그리고 저항 요소(自航 要素)인  $1-w$ 와  $1/r$ ,  $1-t$ 와  $\eta_R$ 이 각각 대칭되는 위치에 있다. 이것은  $1-w$ 가 프로펠러 유입 속도와 선속의 비 [  $1-w = U/V$  ] 이고,  $r$ 이 주기관과 프로펠러 회전수의 비 [  $r = N_o/N_p$  ]을 나타낸다. 또한  $1-t$ ,  $\eta_R$ 은 공히 프로펠러 출력이 주기관과 선체의 출력과 비교되는 과정에서의 손실을 나타내고 있으므로 모두 그림에서 대칭적인 위치에 있는 것이다.

선체와 프로펠러를 결합하고 있는 물리량은 선박의 속도와 프로펠러 회전수를 매개로 한 선체 저항과 프로펠러 추력이며, 프로펠러와 주기관을 결합하는 물리량은 역시 속도와 회전수를 매개로 한 주기관 토크와 프로펠러 토크이다. 그리고 자동운항시스템은 주기관의 회전수 제어를 위한 연료 소모량과 침로 제어를 위한 조종 시스템을 통해서 주기관과 선체에 결합되어 있다.

## 2.2 자연적 감속량의 계산

선박이 파랑 중을 항행 할 경우에 풍압, 파랑 및 선체 동요 등에 의해 선체가 받는 저항은 정수 중에서 받는 저항보다 증가하기 때문에 정수 중과 동일한 마력 하에서는 선속이 저하하게 된다. 이것을 자연적 감속이라 한다. 그러므로 선속을 정수 중에서도 동일하게 유지하기 위해서는 주기관의 출력을 증강시킬 필요가 있다.

또한, 파랑 중에서는 선체 동요에 의해 프로펠러에 작용하는 힘이 주기적으로 변동하여 주기관의 부하가 변동되고 회전수의 변동 원인이 된다. 이러한 변동이 커지게 되면 주기관의 정상적인 운전에 방해가 되기 때문에 운항자는 프로펠러의 회전수를 낮추는 등의 조치를 취해야 한다.[45]

선속의 저하량에는 파랑 중의 저항증가 특성, 프로펠러 특성, 주기출력 특성 등이 깊은 관계가 있다. Nakamura, Naito는 이러한 특성들을 모두 포함시켜 파랑 중의 선속 저하  $\Delta V$ 를 다음과 같이 나타내었다.[46]

$$\Delta V = \frac{R_{AWT}(V, \chi)}{(1-t_0)(1-w_0) \left( P_{TU} + \frac{P_{TN} P_{QU}}{r^2 \eta_t \eta_R E_{QN} - P_{QN}} \right) - \left\{ \left[ \frac{\partial R_O}{\partial V} \right] + \left[ \frac{\partial R_{AWT}}{\partial V} \right] \right\}} \quad (2-1)$$

여기서  $R_{AWT}(V, \chi)$ 는 선속  $V$ 이고 파와의 만남각이  $\chi$ 일 때의 파랑 중 저항증가량이고,  $\partial R_O / \partial V$  및  $\partial R_{AWT} / \partial V$ 는 선속  $V$ 에 대한  $R_O$  및  $R_{AWT}$ 의 미계수이며,  $P_{TU}$ ,  $P_{TN}$ ,  $P_{QU}$ ,  $P_{QN}$ 은 프로펠러 특성으로부터 구한 추력  $T$ 와 토오크  $Q$ 의 프로펠러 유입속도  $U$ 와 회전수  $N$ 에 대한 미계수이다. 그리고  $E_{QN}$ 은 주기관의 성능을 표시하는 계수로서 주기의 특성곡선(주기토오크-회전수곡선)의 선속  $V$

일 때의 작동점에서의 미계수로서  $E_{QN} = \partial Q_e / \partial N_e$ 로 주어진다.  $\gamma$ 은 기어 감속비이며,  $\eta_t$ 는 전달효율,  $\eta_R$ 은 프로펠러 효율비이고, 선박의 자항 요소  $w$ ,  $t$ 는 선속 저하의 전후에서 변화가 없다고 가정한다. 위에서의  $P_{TU}$ ,  $P_{TN}$ ,  $P_{QU}$ ,  $P_{QN}$ 은 프로펠러 단독 특성 곡선을 이용하여 구한다.

또한, 선박의 정수중 항해 속도에 대한 해상 상태별 선속 저하율을 다음과 같이 정의하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_C - V_A}{V_C} = \frac{\Delta V}{V_C} \quad (2-2)$$

여기서,

$\Delta V$  : 선속 저하량

$V_A$  : 파랑 중 균형점에서의 선속

$V_C$  : 평수 중 균형점에서의 선속

Fig. 2-3 ~ Fig. 2-6은 대상 선박인 컨테이너선과 여객선이 해상 상태 (Beaufort scale number) 6, 7, 8을  $F_n=0.2, 0.275$ 로 항해할 때의 자연적 감속량을 나타낸 것이다.

그림에서 X축은 선박과 파의 만남각( $\chi$ )으로,  $\chi=180^\circ$ 는 선수정향파(Head sea),  $\chi=90^\circ$ 는 정횡파(Beam sea),  $\chi=0^\circ$ 는 선미추파(Following sea)를 나타낸다. Y축은 선박의 속도를 노트(Knot)로 표시하였다. 그림의 (····●····)는 정수중 항해시의 속도를 나타내며, (····◆····), (····▲····), (····▶····) 등은 해상 상태 6, 7, 8을 항해할 때의 침로별 선속을 나타낸다.

그림에서 컨테이너선과 여객선은 해상 상태가 거칠수록, 그리고 선수파 부근에서 선속 저하량이 많은 것으로 나타났다. 특히 고속으로 운항하는 경우보다는 저속일 때 선속 저하량이 많은 특징을 보이고 있다.

Fig. 2-3, Fig. 2-4에 나타난 컨테이너선의 경우, 일반적으로 모든 선속에서 파와의 만남각이 선수파에서 정횡파 방향으로 이동하면 선속의 자연적 감속량이 급격히 줄어드는 경향을 보이고 있다. 특히 선속  $F_n=0.275$  (22.14kts)의 경우 추사파 및 추파( $\chi=60^\circ \sim 0^\circ$ )에서는 선속이 약간 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 2-5, Fig. 2-6에 나타난 여객선의 경우도, 컨테이너선과 마찬가지로 정횡파( $\chi=90^\circ$ )부근에서 감속량이 급격히 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 그러나 여객선의 경우에는 선속 증가 현상은 나타나지 않았다.

대상 선박의 선속 저하율을 보면, 저속선인 여객선이 고속선인 컨테이너선에 비해 선속 저하율이 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 저속선이 고속선에 비하여 풍파 중에서 선속 저하율이 높다는 일반적인 연구결과와 일치함을 보여준다.[47]

파랑 중을 항행하는 선박의 자연적 감속량을 해상 상태에 따라 침로별로 계산함으로써, 항해안전성 평가의 가장 기본적인 요소인 선체 운동 계산을 실제 해상에 가깝게 추정할 수 있게 되었다. 또한 파랑 중 선박의 안전 확보를 위해서는 기본적으로 조선(操船)에 필요한 최소한의 선속(타효 속력)을 유지해야 한다. 따라서 파랑 중을 항행하는 선박의 운항자는 선박의 타효 속력을 반드시 확보해야 하므로 설정된 선속은 자연적 감속량을 고려한 상태에서 결정되어야 할 것이다.

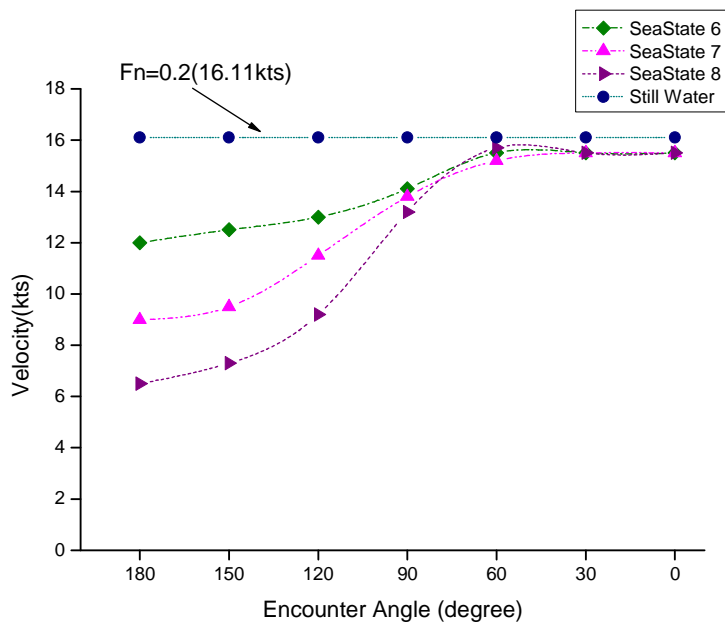


Fig. 2-3 Involuntary speed loss of container ship in a seaway( $F_n=0.2$ )

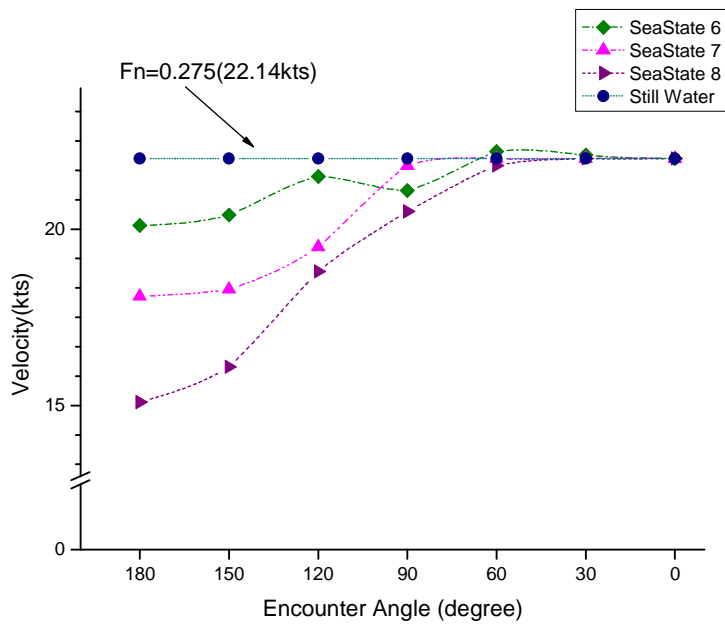


Fig. 2-4 Involuntary speed loss of container ship in a seaway( $F_n=0.275$ )

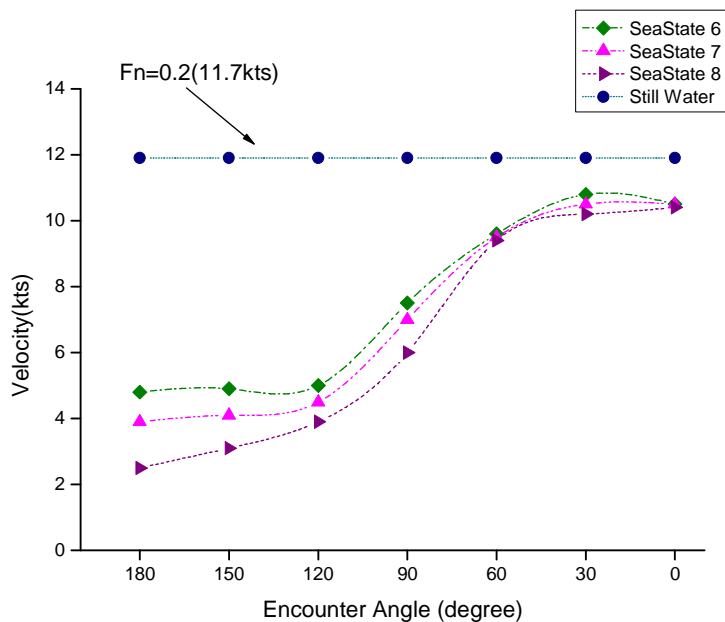


Fig. 2-5 Involuntary speed loss of passenger ship in a seaway( $F_n=0.2$ )

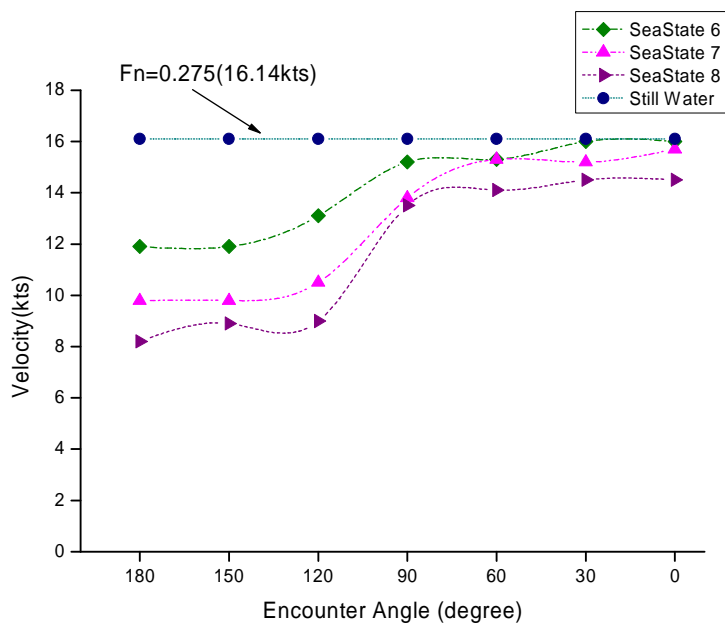


Fig. 2-6 Involuntary speed loss of passenger ship in a seaway( $F_n=0.275$ )

## 2.3 내항성능 평가요소

### 2.3.1 해양파 스펙트럼

불규칙적인 해상 상태는 수많은 규칙적인 소성파들을 중첩시켜 표현할 수 있고, 개개의 소성파들은 각각의 진폭, 진행 방향과 주파수 및 위상 값을 가진다. 이러한 소성파들의 합성으로 이루어진 불규칙파의 순간 시간에 대한 파고의 변동은 Gauss 분포를 하며, 그 진폭 변동의 극치는 Rayleigh 분포에 따른다. 이와 같은 불규칙한 해양파는 스펙트럼 분석 방법에 의해 이론적 특성 해석이 가능하다. 본 연구 개발에서는 국제선체구조회의 (ISSC)에서 채용한 장파정 해양파 스펙트럼인 P-M (Modified Pierson-Moskowitz)형 스펙트럼을 채택하였으며, 스펙트럼 식은 다음과 같이 표현된다.[48]

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 (H_{1/3})^2 T_0 \left( \frac{T_0}{2\pi} \omega \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left( \frac{T_0 \omega}{2\pi} \right)^{-4} \right\} \quad (2-3)$$

여기서,  $T_0$  : 평균파주기

$H_{1/3}$  : 유의파고

$\omega$  : 파의 원주파수(Circular frequency)

또한, 실제 해상에 가깝게 표현하기 위해 식 (2-3)에 성분파의 방향 스펙트럼을 고려한 단파정(Short crested wave) 불규칙파로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega, \theta) = \frac{2}{\pi} S_{\zeta}(\omega) \cos^2 \theta \quad \left( -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (2-4)$$

$$= 0 \quad (\text{기타의 경우})$$

여기서,  $\theta$  : 파의 평균 진행 방향과 성분파가 이루는 각도



선박이 파도와 의 만남각(Encounter angle)  $\chi$ , 속도  $V$ 로서 항해 중일 때 선체와 파와의 만남주파수( $\omega_e$ )와 파도의 원주파수( $\omega$ ) 사이에는  $\omega_e = \omega(1 - \frac{\omega V}{g} \cos \chi)$ 의 관계가 성립하므로,  $\omega$ 로서 표현된 파의 스펙트럼  $S_\zeta(\omega, \theta)$ 은 만남 주파수  $\omega_e$ 로서 표현된  $S_\zeta(\omega_e, \theta)$ 로 변형하여 계산하며, 그 식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_e}{d\omega} &= 1 - \frac{2\omega V}{g} \cos \chi \\ d\omega_e &= (1 - \frac{2\omega V}{g} \cos \chi) d\omega \end{aligned} \quad (2-5)$$

파도의 원주파수  $\omega$ 와 이에 대응하는  $\omega_e$ 를 갖는 스펙트럼 아래의 면적은 크기가 서로 같아야 함으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_\zeta(\omega, \theta) d\omega &= S_\zeta(\omega_e, \theta) d\omega_e \\ S_\zeta(\omega_e, \theta) &= S_\zeta(\omega, \theta) \frac{d\omega}{d\omega_e} \end{aligned} \quad (2-6)$$

따라서, 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$S_\zeta(\omega_e, \theta) = \frac{S_\zeta(\omega, \theta)}{1 - (2\omega V/g) \cos \chi} \quad (2-7)$$

### 2.3.2 내항성능 평가요소와 그 시스템적 결합

불규칙한 해상을 항해하는 선박의 인명, 선체, 화물의 안전을 고려하여 파랑 등의 외력에 대한 선박의 내항성능을 평가하기 위해, 선체의 운동으로부터 발생하는 다음과 같은 현상을 선박의 내항성능 평가요소로 채택하였다.[49-51]

- (1) Deck wetness
- (2) Propeller racing
- (3) Slamming
- (4) 횡동요
- (5) 상하가속도
- (6) 좌우가속도

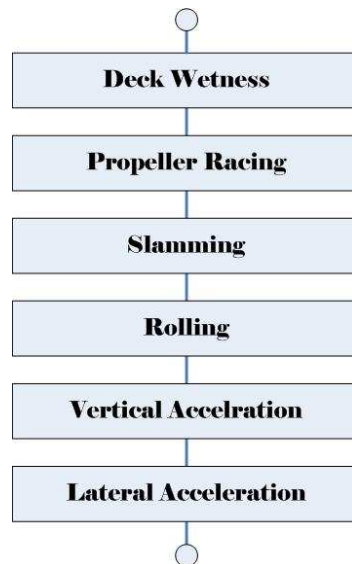


Fig. 2-7 Serial combination of factors for evaluating seakeeping performance

파랑 중을 항해하는 선박에서 각 내항성능 평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때에 그 현상이 발생하고, 그 발생 확률이 주어진 한계발생확률을 초과할 때 선박은 파랑 중에서 기능을 잃거나 아니면 위험하게 된다. 이와 같은 각 내항성능 평가요소의 시스템적 결합은 Fig. 2-7에 나타난 바와 같이 직렬 결합(Serial combination) 구조로서, 한 가지 요소만이라도 발생확률이 한계발생확률을 초과할 경우 선박은 전체 내항성능 기능을 잃어 위험한 상태에 도달하게 된다.[52]

Table 2-1 Factors presently adopted for evaluating seakeeping performance and their critical values

내항성능 평가요소	한계치	한계발생 확률
Deck wetness	정수 중 항주시의 수위 상승을 고려한 선수 수선(F.P)의 유효건현[53]	$2 \times 10^{-2}$
Propeller racing	정수 중 항주 시의 상대 수위 상승을 고려하지 않은 상태에서 Propeller 반경의 $\frac{1}{3}$ 노출[54]	$10^{-1}$
Slamming	S.S.8½에서 선저노출과 동시에, 파에 돌입할 때 선저의 파면에 대한 상대속도가 한계속도(Threshold velocity)를 초과하는 것[55-56] 단, Threshold velocity = $0.09\sqrt{gL}$	$10^{-2}$
횡동요	선체중양부 weather side의 bulwark top에 해수가 유입하는 것을 한계 상태로 하여 정수 중 흘수면에서 bulwark top까지의 높이[57]	$10^{-3}$
좌우가속도	선교에서 좌우가속도가 0.38g를 초과할 경우[58]	$10^{-3}$
상하가속도	선교에서 상하가속도가 0.56g를 초과할 경우[59]	$10^{-3}$

한편, 이들 각 내항성능 평가요소들에 대해 일반적으로 적용되고 있는 한계치와 한계발생확률은 Table. 2-1과 같다. 여기에서 각 내항성능 평가요소에 대한 한계발생확률이 다르게 제안되어져 있다. 이것은 각 요소에 대한 연구가 따로 행하여져 얻은 결과이기도 하고, 한편으로는 내항성능 평가시 각 요소의 중요도를 달리 부여한 의미도 있다.

### 2.3.3 내항성능 평가요소의 분산치

선박이 단파정 불규칙과 중을 일정한 속도로 파에 대하여 일정한 침로( $\chi$ )를 유지하면서 항해하고 있는 경우, 선체 운동 응답 계산을 위한 NSM에 의해 구하여진 임의의 내항성능 평가요소의 확률 과정 ( $X_i(t)$ )의 주파수 응답 함수를  $H_x(\omega, V, \chi - \theta)$ 라 하면, 확률 과정  $X_i(t)$ 의 P-M형 스펙트럼  $S_x(\omega, \chi)$ 은 다음과 같다.[60]

$$S_{x_i}(\omega, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |H_{x_i}(\omega, V, \chi - \theta)|^2 S_{\zeta}(\omega, \theta) d\theta \quad (2-8)$$

또한 확률 과정 ( $X_i(t)$ )의 분산치 ( $\sigma_{X_i}^2(X)$ )는 다음과 같다.

$$\sigma_{x_i}^2(\chi, V, S) = \int_0^{\infty} S_{x_i}(\omega, \chi) d\omega \quad (2-9)$$

여기에서 식 (2-9)의 분산치를 변화시키는 변수는 선박과 파와의 만남각( $\chi$ ), 선박의 속도( $V$ ), 해상 상태( $S$ )이다.

분산치를 방향과 성분을 고려하여 수치 계산을 할 때, 근사적으로 이용하는 단파정파에서의 분산치 ( $\sigma_s$ )와 장파정파에서의 분산치 ( $\sigma_L$ )의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\sigma_S^2(0^\circ) &= \frac{1}{9} \{4\sigma_L^2(0^\circ) + 3\sigma_L^2(30^\circ) + 2\sigma_L^2(60^\circ)\} \\
\sigma_S^2(30^\circ) &= \frac{1}{9} \{1.5\sigma_L^2(0^\circ) + 5\sigma_L^2(30^\circ) + 1.5\sigma_L^2(60^\circ) + \sigma_L^2(90^\circ)\} \\
\sigma_S^2(60^\circ) &= \frac{1}{9} \{\sigma_L^2(0^\circ) + 1.5\sigma_L^2(30^\circ) + 4\sigma_L^2(60^\circ) + 1.5\sigma_L^2(90^\circ) + \sigma_L^2(120^\circ)\} \\
\sigma_S^2(90^\circ) &= \frac{1}{9} \{\sigma_L^2(30^\circ) + 1.5\sigma_L^2(60^\circ) + 4\sigma_L^2(90^\circ) + 1.5\sigma_L^2(120^\circ) + \sigma_L^2(150^\circ)\} \quad (2-10) \\
\sigma_S^2(120^\circ) &= \frac{1}{9} \{\sigma_L^2(60^\circ) + 1.5\sigma_L^2(90^\circ) + 4\sigma_L^2(120^\circ) + 1.5\sigma_L^2(150^\circ) + \sigma_L^2(180^\circ)\} \\
\sigma_S^2(180^\circ) &= \frac{1}{9} \{2\sigma_L^2(120^\circ) + 3\sigma_L^2(150^\circ) + 4\sigma_L^2(180^\circ)\} \\
\sigma_S^2(150^\circ) &= \frac{1}{9} \{\sigma_L^2(90^\circ) + 1.5\sigma_L^2(120^\circ) + 5\sigma_L^2(150^\circ) + 1.5\sigma_L^2(180^\circ)\}
\end{aligned}$$

스펙트럼이 식 (2-5)과 같이 표현될 경우, 내향성능 평가요소의 확률 과정 ( $X_i(t)$ )는 다음과 같이 된다.[61]

$$X_i(t) = \int_0^\infty \sqrt{2 S_{X_i}(\omega, \chi)} d\omega \cdot \cos(\omega t + \psi_i) \quad (2-11)$$

여기서,

$$\psi_i = \epsilon(\omega) + \gamma_i$$

$$\gamma_i : 0 \sim 2\pi \text{까지 일양 분포하는 위상각}$$

선체운동은 파와의 만남 주파수( $\omega_e = \omega - KV \cos \chi$ ,  $K$ : 파수)를 이용하여 계산한다.

### 2.3.4 내향성능 평가요소의 발생확률 및 한계표준편차

내향성능 평가요소의 확률과정 ( $X_i(t)$ )의 순간 시간에 대한 진폭 변동은 Gauss 분포를 따르고, 그 극치는 Rayleigh 분포에 따른다. 임의의 내향성능 평가요소의 분산치 ( $\sigma_{X_i}^2$ )이 구해지면, 확률과정 ( $X_i(t)$ )의 극치가 어떤 일정한 값

$X_1$ 을 초과할 확률  $Q_{X_i}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_{X_i} &= \int_{X_1}^{\infty} \left( \frac{X_i}{\sigma_{X_i}} \right) \exp\left(-\frac{X_i^2}{2\sigma_{X_i}^2}\right) dX \\ &= \exp\left(-\frac{X_1^2}{2\sigma_{X_i}^2}\right) \end{aligned} \quad (2-12)$$

이것을 표준편차 ( $\sigma_{X_i}$ )에 관하여 풀면 아래 식이 된다.

$$\sigma_{X_i} = \sqrt{\frac{-X_1^2}{2\ln Q_{X_i}}} \quad (2-13)$$

식 (2-13)에 각 내항성능 평가요소의 한계치 ( $X_{ic}$ )를 넘을 확률인 한계발생확률 ( $Q_{X_{ic}}$ )를 고려하면, 위험치가 되는 한계표준편차 ( $\sigma_{X_{ic}}$ )를 구할 수 있다.

$$\sigma_{X_{ic}} = \sqrt{\frac{-X_{ic}^2}{2\ln Q_{X_{ic}}}} \quad (2-14)$$

## 2.4 내항성능 평가치와 위험도

선박의 내항성능 평가는 일반적으로 각 내항성능 평가요소가 그 한계치를 초과하는 발생 확률로부터 정의되는 평가치, 위험도, 최대 위험도, 상대 위험도를 적용한다.[62-63]

### 2.4.1 평가치

임의 내항성능 평가요소의 극치 분포는 Rayleigh 분포로서, 그 발생확률을  $Q(X_i)$ 라고 하면, 임의 내항성능 평가요소의 평가치 ( $E_{X_i}$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$E_{X_i} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln \{Q(X_i)\}}} = \left[ \frac{\sigma_{X_i}}{X_i} \right] \quad (2-15)$$

평가치 ( $E_{X_i}$ )가 0이 되면 임의 요소  $X_i$ 의 신뢰도는 1이 되고,  $E_{X_i}$ 가 무한대가 되면  $X_i$ 요소의 신뢰도는 0이 된다.

### 2.4.2 위험도

임의  $X_i$ 요소의 주어진 한계발생확률에 관한 한계 평가치를  $E_{X_{ic}}$ 로 하고, 한계 평가치 ( $E_{X_{ic}}$ )에 대한 평가치 ( $E_{X_i}$ )의 비를  $X_i$ 요소의 위험도 ( $\mu_{X_i}$ )라 정의한다.

$$\mu_{X_i} = \frac{E_{X_i}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[ \frac{X_i}{\sigma_{X_{ic}}} \right]}{\left[ \frac{X_i}{\sigma_{X_i}} \right]} = \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_{X_{ic}}} \quad (2-16)$$

여기서,  $\sigma_{X_{ic}}$ 는  $X_i$ 가 위험하게 되는 한계표준편차

위험도 ( $\mu_{X_i}$ )는 파에 대한 만남각( $X$ ), 선속( $V$ ) 및 해상 상태( $S$ )에 따라 변화한다. 여기에서  $\mu_{X_i} \geq 1.0$ 인 경우  $X_i$ 요소가 위험하고,  $\mu_{X_i} < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다.

### 2.4.3 최대 위험도와 상대 위험도

내향성능 평가요소의 위험도 ( $\mu_{X_i}$ )에서 최대치를 최대 위험도 ( $\mu_m$ )이라 정의한다.

$$\mu_m(\chi, V, S) = \text{Maximum}[\mu_i(\chi, V, S)] \quad (2-17)$$

이  $\mu_m$ 은 어떤 상황하에서  $\mu_{X_i}$ 의 최고치인 값으로서, 그 값은 각 요소에 대한 상대치로 비교되는 값이다.

또한 임의의  $X_i, X_j$ 요소의 위험도가  $\mu_i, \mu_j$  인 경우,  $X_i$ 요소를 기준으로 하여 나타낸  $X_j$ 요소의 위험도의 비를  $X_i$ 요소에 대한  $X_j$ 요소의 상대 위험도 ( $\mu_{ij}$ )라 정의한다.

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_i}{\mu_j} = \frac{\frac{X_i}{\sigma_{X_i}}}{a_{ij} \left[ \frac{X_j}{\sigma_j} \right]} = \frac{\sigma_{X_{jc}}}{\sigma_{X_{ic}}} \cdot \frac{\sigma_{X_j}}{\sigma_{X_i}} \quad (2-18)$$

$$\text{단, } a_{ij} = \frac{E_{X_{jc}}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[ \frac{X_{ic}}{\sigma_{X_{ic}}} \right]}{\left[ \frac{X_{jc}}{\sigma_{X_{jc}}} \right]}$$

여기에서  $\mu_{ij} > 1.0$ 인 경우는  $X_i$ 요소에 비해  $X_j$ 요소가 더 위험하고,  $\mu_{ij} < 1.0$ 인 경우는 그 반대의 의미를 갖는다.

이러한 상대 위험도 ( $\mu_{ij}$ )를 계산함으로써 기준 요소인  $X_i$ 요소와 임의의  $X_j$ 요소는 상대적으로 동등하게 성능을 평가할 수 있게 된다. 그것은  $X_i$ 요소의



한계치를  $\alpha_{ij} \cdot \mu_{ij}$  배한 값이  $X_j$ 요소의 결보기 한계치( $X_{jc}$ )로 되기 때문에 기준으로 한  $X_j$ 요소로서 임의의  $X_j$ 요소의 상태를 평가할 수 있다.

## 2.5 상하가속도 계측에 의한 항해안전성 평가

파랑 중을 항해하는 선박에서 각 내항성능 평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때 앞의 6가지 현상은 발생하고, 그 발생확률이 주어진 한계발생확률을 넘을 때 선박은 파랑 중에서 그 기능을 상실하거나 아니면 위험하게 된다.

그런데 앞에서 밝힌 바와 같이 기존의 연구에서 내항성능 평가요소에 대한 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어 있고, 그 시스템적 결합은 직렬 결합이다. 따라서 기존의 내항성능 평가요소를 이용하여 선박의 항해안전성을 평가하기 위해서는 모든 내항성능 평가요소를 계측하여야 한다. 그러나 각 요소의 특성상 계측을 위한 센서의 설치가 불가능한 것도 있고, 또 모든 요소에 센서를 설치하여 평가하는 것은 경제적인 면에서도 문제가 있다.

그래서 선박의 종류, 적재 상태(홀수 상태) 등에 관계없이, 어떤 운항 상태에서도 한 개의 내항성능 평가요소만을 계측하여 선박시스템 전체의 항해안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 내항성능지표 (SPI: Seakeeping Performance Index)가 개발되었다.

이것은 기존의 각 내항성능 평가요소에 한계발생확률이 주어져 있는 것은 동일한 위험도를 가지는 요소는 위험하게 되는 정도가 같다는 것을 의미한다. 신뢰성 공학에서 시스템 요소의 고장 발생 확률이 같은 경우, 그 고장률이 동일하게 되는 것과 같은 의미를 가진다. 그러므로 각 내항성능 평가요소의 위험도

가 같은 경우, 그 발생 확률도 같다는 것으로 변환하여 계산하는 것으로 선박 시스템 전체의 항해안전성을 평가할 수 있는 내항성능지표가 개발되었다.

이 내항성능지표는 임의의 한 개의 내항성능 평가요소만을 계측하여도 6개 내항성능 평가요소 전체의 최대 위험도를 계산할 수 있다. 따라서 6개 요소를 모두 계측하지 않아도 전체 선박 시스템의 항해안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 또한 이 지표는 기존의 6개 내항성능 평가요소의 위험도가 모두 1보다 작은 경우 최대 위험도를 이용하면 전체 선박 시스템이 안전하게 평가되는 부분을 보완하여, 6개 내항성능 평가요소를 종합하여 보다 항해 안전을 도모한 평가가 가능하게 한다.

이 내항성능지표를 이용하여 선박의 항해안전성을 해상 상태에 따라 침로별로 종합적으로 평가하여 화면으로 표시할 수 있는 평가도상에 나타낸다.

### 2.5.1 내항성능 평가요소의 변환 평가치

기존의 연구에 의하면, 파랑 중을 항해하는 선박 시스템의 내항성능을 평가할 수 있는 요소의 한계발생확률이 각각 다르게 설정되어 있다. 따라서 한계발생확률이 큰 내항성능 평가요소에 비해서 작은 요소의 위험도가 전체 선박 시스템의 내항성능 평가에서 무시되어 위험한 상태가 안전한 상태로 평가되는 경우가 있다. 이것을 보완하기 위해서는 각 내항성능 평가요소들이 한계발생확률에 도달하면, 그 위험도가 한계발생확률이 가장 큰 프로펠러 레이싱의 한계발생확률( $Q_{P_c} = 10^{-1}$ )에 도달하는 것과 같은 값으로 변환하여 평가하는 것이다. 즉 각 내항성능 평가요소의 위험도가 프로펠러 레이싱의 위험도와 같은 경우, 그 발생 확률도 프로펠러 레이싱의 발생 확률과 동일하게 되는 각 내항성능 평

가요소의 평가치 ( $E_i$ )에 대한 변환 평가치 ( $\widetilde{E}_i$ )를 다음과 같이 계산한다.

1) 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치

$$\widetilde{E}_P = \frac{E_P}{\alpha_{PP}} = E_P \cdot \frac{E_{Pc}}{E_P} = E_P \quad (2-19)$$

여기서,

$$E_P : \text{프로펠러 레이싱의 평가치} \quad \left( \frac{\sigma_P}{X_P} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(Q_P)}} \right)$$

$\widetilde{E}_P$  : 프로펠러 레이싱의 변환 평가치

$$E_{Pc} : \text{프로펠러 레이싱의 한계 평가치} \quad \left( \frac{\sigma_{Pc}}{X_P} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(0.1)}} \right)$$

2) 프로펠러 레이싱 이외의 임의 요소에 대한 변환 평가치

$$\begin{aligned} \widetilde{E}_i &= \frac{E_i}{\alpha_{Pi}} = \frac{E_{Pc}}{E_{ic}} \cdot E_i = \mu_i \cdot E_{Pc} \\ \widetilde{E}_j &= \frac{E_j}{\alpha_{Pj}} = \frac{E_{Pc}}{E_{jc}} \cdot E_j = \mu_j \cdot E_{Pc} \end{aligned} \quad (2-20)$$

여기서,

$$\alpha_{Pi} : \text{프로펠러 레이싱과 i요소의 한계 평가치의 비} \quad \left( = \frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \right)$$

$$\mu_i : \text{i요소의 위험도} \quad \left( = \frac{E_i}{E_{ic}} \right)$$

식 (2-19), (2-20)에서 위험도가 같은 경우 변환 평가치도 같아지며, 그 발생 확률 ( $\widetilde{Q}_i$ )도 같은 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

$$\mu_i = \mu_j \quad \Rightarrow \quad \widetilde{E}_i = \widetilde{E}_j, \quad \widetilde{Q}_i = \widetilde{Q}_j \quad (2-21)$$

## 2.5.2 내항성능지표의 정의

앞에서 기술된 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치를 이용하여, N 개의 내항성능 평가요소로 구성되는 선박 전체 시스템의 변환 평가치 ( $\widetilde{E}_T$ )와 한계 평가치 ( $E_{Tc}$ )에 대한 개념을 분석하여 내항성능지표 (SPI)를 정의할 수 있다.

선박 전체 시스템의 변환 평가치 ( $\widetilde{E}_T$ )는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{E}_T = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1-\widetilde{P}_T)}} \quad (2-22)$$

$$\text{여기서, } \widetilde{P}_T = \prod_{i=1}^n \widetilde{P}_i$$

선박의 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수 ( $\widetilde{P}_i$ )는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\widetilde{E}_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i}}{\widetilde{E}_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} \cdot X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q(X_i)^{\alpha_{P_i}^2} \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\text{여기서, } Q(X_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\}$$

그리고 선박 시스템의 한계 평가치 ( $E_{Tc}$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{Tc} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1-P_{Tc})}} \quad (2-24)$$

여기서,

$$P_{Tc} = \prod_{i=1}^n P_{ic} \quad (2-25)$$

$$P_{ic} = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_{ic}}\right)^2\right\} = 1 - Q_{X_{ic}}$$

$P_{Tc}$  : 내항성능 신뢰도 함수

$Q_{X_{ic}}$  : 각 요소의 한계발생확률 (Rayleigh 분포)

따라서 선박 시스템 전체의 항해안전성은 식 (2-24)의 한계 평가치 ( $E_{Tc}$ )와 식 (2-22)의 변환 평가치 ( $\widetilde{E}_T$ )의 관계로서 내항성능지표 (SPI)를 계산하여 평가하게 된다. 여기서 내항성능지표 (SPI)는 다음과 같이 정의된다.

$$SPI = \frac{\widetilde{E}_T}{E_{Tc}} = \sqrt{\frac{\ln(1-P_{Tc})}{\ln(1-\widetilde{P}_T)}} \quad (2-26)$$

여기에서  $SPI \geq 1.0$ 인 경우 선박 시스템 전체는 위험하게 되고,  $SPI < 1.0$ 인 경우 시스템은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

또한 이 내항성능지표는 내항성능 평가요소 중 한 개의 요소라도 그 위험도가 1보다 큰 경우, 내항성능지표도 1보다 크게 되는 성질을 가지고 있다.

따라서 내항성능지표 (SPI)는 내항성능 평가요소의 최대 위험도와 근사하는 값이 된다. 이것은 한 개의 요소만을 계측하여 모든 내항성능 평가요소의 최대

위험도의 근사치를 구할 수 있어, 간편하고 편리한 하드웨어 제작에 여러 가지 이점이 있을 것으로 판단된다.

$$SPI \doteq \mu_m(\chi, V, S) = \text{Maximum}[\mu_i(\chi, V, S)] \quad (2-27)$$

### 2.5.3 임의의 한 개 요소에 의한 항해안전성 평가

식 (2-23)의 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수( $\widetilde{P}_i$ )는 상대 위험도 ( $\mu_{ij}$ )를 매개로 하여 임의의 내항성능 평가요소 한 개만을 측정하여도 계산이 가능하다. 이것을 이용하여 파랑 중을 항해하는 선박의 항해안전성을 평가할 수 있는 내항성능지표는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{im}}{\beta_i \sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{im}}{\alpha_{P_i} \mu_{ij} \sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{ic}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{im}}{\mu_{ij} \sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i}}{\mu_{ij}} \cdot \frac{X_{im}}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q(X_{im})^{\left(\frac{\alpha_{P_i}}{\mu_{ij}}\right)^2} \end{aligned} \quad (2-28)$$

여기서,

$X_{im}$  : 측정하는 임의의 내항성능 평가요소

$$\beta_i = \alpha_{ij} \cdot \mu_{ij}$$

$\mu_{ij}$  : 임의 i요소에 대한 임의 j요소의 상대 위험도

$\alpha_{Pi}$  : 프로펠러 레이싱에 대한 임의 i요소의 한계평가치의 비

## 2.5.4 상하가속도 계측에 의한 항해안전성 평가

앞에서 정의된 내항성능지표는 기존의 내항성능 평가요소 중 한 개 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 따라서 기존 내항성능 평가요소 중 계측성이 편리하고, 화물의 안전과 승조원의 작업성 등에 직접적인 영향을 주는 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해안전성을 평가한다. 식 (2-23)의  $\tilde{P}_i$ 는 상하 가속도를 계측하여 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 내항성능지표를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\beta_i \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\alpha_{P_i} \mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{AVc}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{AV}}{\mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}} \cdot \frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - Q(X_{AV})^{\left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}}\right)^2}
 \end{aligned} \tag{2-29}$$

$$\text{여기서, } Q(X_{AV}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\}$$

$$\beta_i = \alpha_{AVi} \cdot \mu_{AVi}$$

$\mu_{AVi}$  : 상하 가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도

$\alpha_{PAV}$  : 프로펠러 레이싱에 대한 상하 가속도의 한계 평가치의 비

그런데 프로펠러 레이싱과 상하 가속도의 한계발생확률이 각각  $Q_{P_c} = 10^{-1}$ ,  $Q_{AV_c} = 10^{-3}$ 이므로,  $\alpha_{PAV} = 1/\sqrt{3}$ 로 되는 값이다. 따라서 식 (3-27)은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{P}_i = 1 - Q(X_{AV})^{\frac{1}{3} \left( \frac{1}{\mu_{AVi}} \right)^2} \quad (2-30)$$

여기서, 선박 전체시스템의 변환평가치는 아래 식과 같다.

$$\widetilde{E}_T = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1 - \widetilde{P}_T)}} \quad (2-31)$$

계산된 식 (2-31)의 변환평가치와 식 (2-24)의 한계평가치를 통해 실선 계측 결과에 의한 내항성능지표를 아래 식과 같이 구한다.

$$SPI = \frac{\widetilde{E}_T}{E_{TC}} = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_{TC})}{\ln(1 - \widetilde{P}_T)}} \quad (2-32)$$

Fig. 2-8 ~ Fig. 2-21은 식 (2-30)을 식 (2-23)에 대입하여 계산한 대상 선박인 컨테이너선, 여객선, 자동차 전용선, 벌크선에 대한 내항성능지표와 내항 성능 평가요소의 위험도( $\mu_i$ )를 비교하여 나타낸 것이다. 수치계산에 이용되어진 대상 선박인 컨테이너선, 여객선, 자동차 전용선, 벌크선의 주요 목 및 적재 상태는 【부록】에 나타내고 있다.



그림에서 X축은 선박과 파의 만남각( $\chi$ )으로,  $\chi = 180^\circ$ 는 선수정향파,  $\chi = 90^\circ$ 는 정횡파,  $\chi = 0^\circ$ 는 선미추파를 나타내고, Y축은 내향성능 위험도를 표시하였다. 그림의 (---●---)은 내향성능지표를 나타내며, 각 점선 (---□---), (---×---), (---◇---), (---△---), (---▷---) 등은 각 내향성능 평가요소의 위험도를 나타내고 있다.

컨테이너선, 여객선, 자동차 전용선의 경우, 선수파 부근에서는 상하 가속도가, 횡파와 선미 추파 부근에서에서는 좌우 가속도가 최대 위험 요소이며, 벌크선의 경우 전 만남각에서 횡동요가 최대 위험 요소이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 해상 상태나 선속에 관계없이 내향성능지표와 최대 위험도가 근사하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 사실은 다른 선속과 해상 상태에서도 같은 경향을 나타낸다는 사실을 확인할 수 있었다.

또한, 특이한 사항으로는 컨테이너선과 자동차 전용선의 경우 위험도를 이용하여 평가하는 경우 정횡파 부근에서 안전한 것으로 평가되고 있으나, 모든 요소의 위험도가 1에 근접해 있어 내향성능지표를 이용하는 경우 위험하게 평가되는 것이다. 이것은 기존의 6개 내향성능 평가요소의 위험도가 1보다 작아 전체 선박이 안전한 것으로 평가되는 부분을 보완하고 있는 것이다. 다시 말해서 각 내향성능 평가요소의 위험도가 1보다 작다고 하더라도 전체 요소의 위험도를 종합적으로 평가하면 반드시 안전하다고 할 수 없다는 것이다. 이러한 부분도 보완해 주는 것이 내향성능지표이다.

Sea State 8  $F_n=0.2(16.1\text{kts})$  in still water

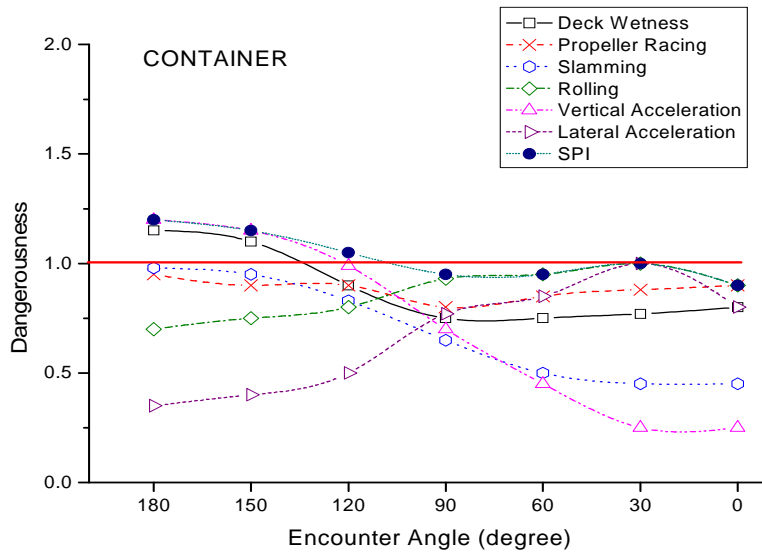


Fig. 2-8 Seakeeping performance index of container ship(sea state 8,  $F_n=0.2$ )

Sea State 8  $F_n=0.275(22.1\text{kts})$  in still water

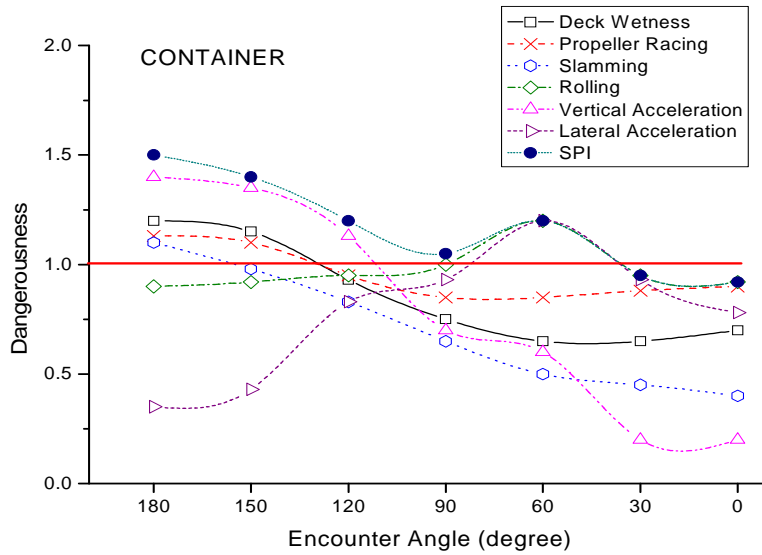


Fig. 2-9 Seakeeping performance index of container ship(sea state 8,  $F_n=0.275$ )

Sea State 8  $F_n=0.2(11.7\text{kts})$  in still water

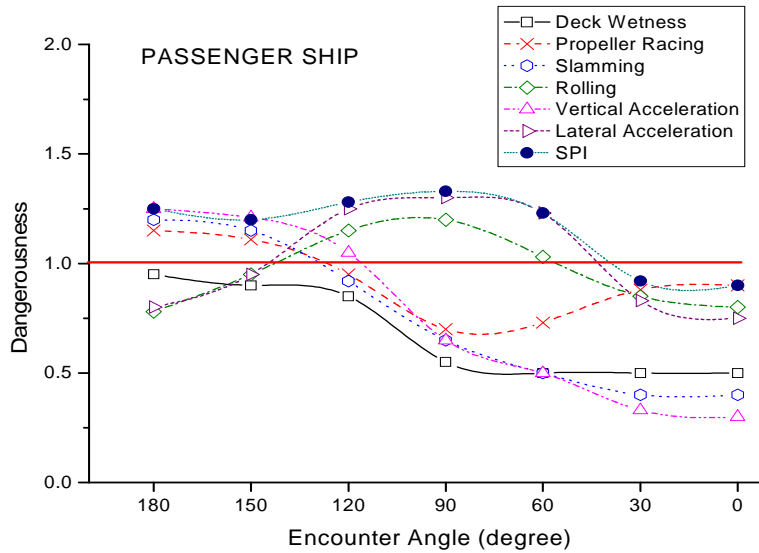


Fig. 2-10 Seakeeping performance index of passenger ship(sea state 8,  $F_n=0.2$ )

Sea State 8  $F_n=0.275(16.1\text{kts})$  in still water

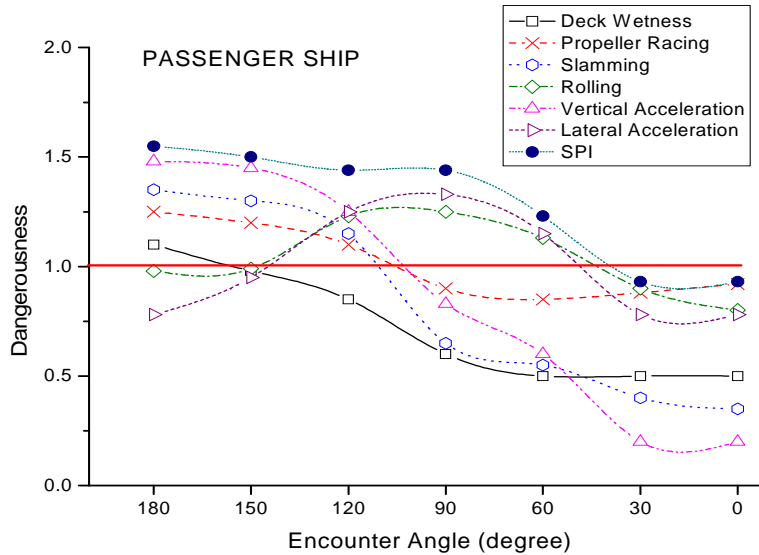


Fig. 2-11 Seakeeping performance index of passenger ship(sea state 8,  $F_n=0.275$ )

Sea State 8  $F_n=0.2(15.6\text{kts})$  in still water

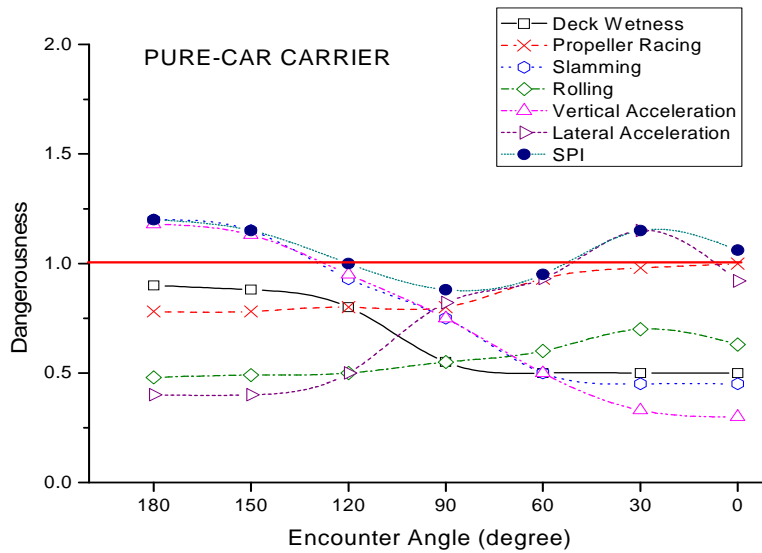


Fig. 2-12 Seakeeping performance index of pure car carrier(sea state 8,  $F_n=0.2$ )

Sea State 8  $F_n=0.275(21.4\text{kts})$  in still water

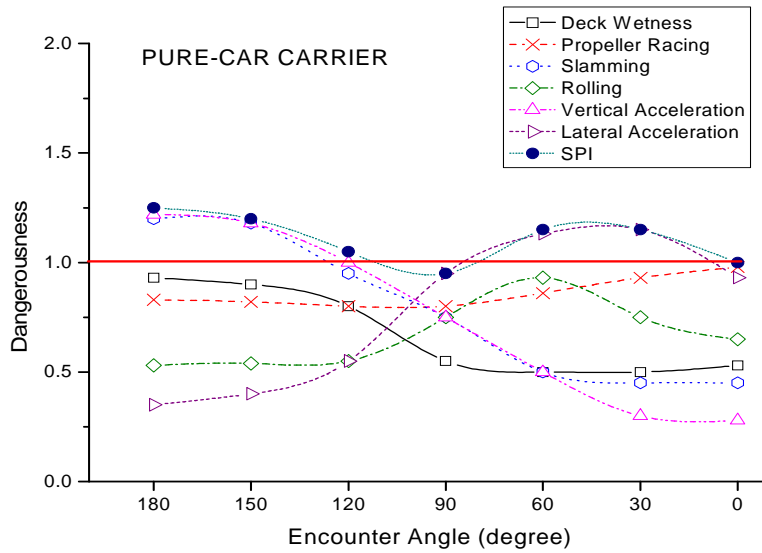


Fig. 2-13 Seakeeping performance index of pure car carrier(sea state 8,  $F_n=0.275$ )

Sea State 8  $F_n=0.125(12.2\text{kts})$  in still water  
(Homo. Full loaded condition)

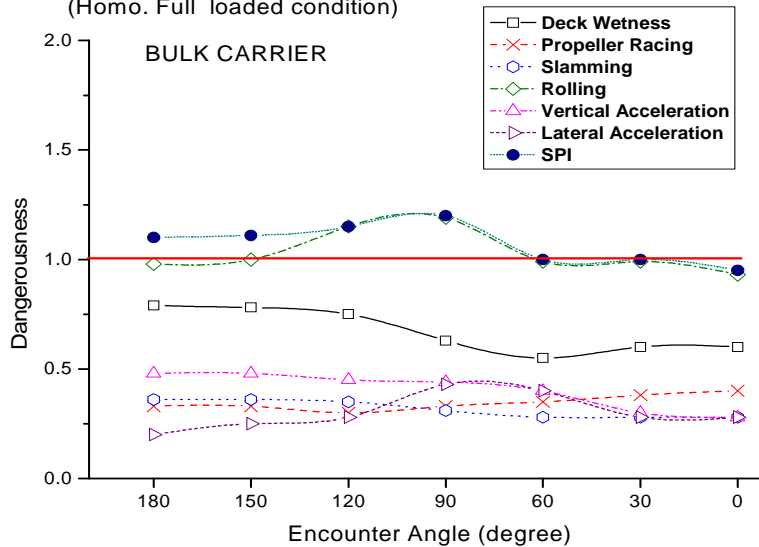


Fig. 2-14 Seakeeping performance index of bulk carrier(full loaded)

Sea State 8  $F_n=0.15(14.7\text{kts})$  in still water  
(Homo. Full loaded condition)

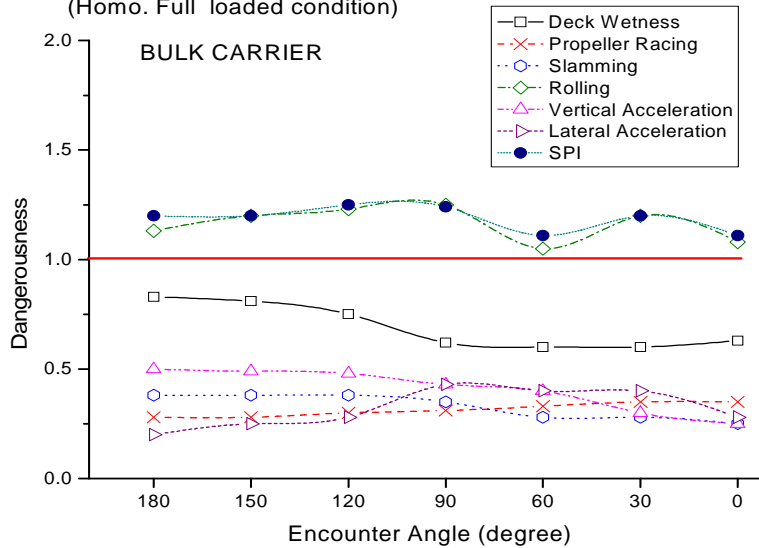


Fig. 2-15 Seakeeping performance index of bulk carrier(full loaded)

Sea State 8  $F_n=0.125(12.2\text{kts})$  in still water  
(Homo. half loaded condition)

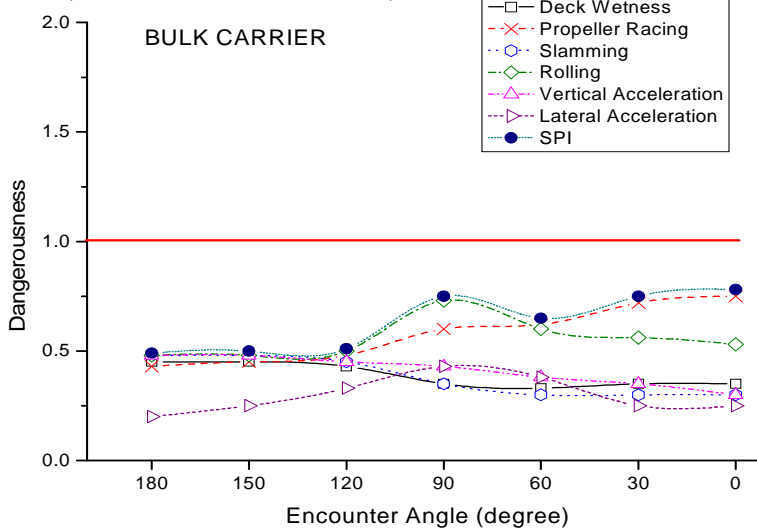


Fig. 2-16 Seakeeping performance index of bulk carrier(half loaded)

Sea State 8  $F_n=0.15(14.7\text{kts})$  in still water  
(Homo. half loaded condition)

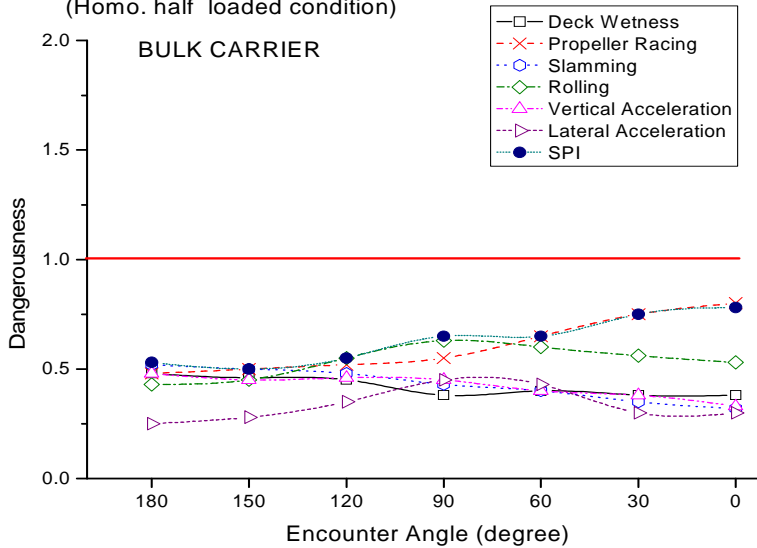


Fig. 2-17 Seakeeping performance index of bulk carrier(half loaded)

Sea State 8  $F_n=0.125(12.2\text{kts})$  in still water  
(Heavy ballast loaded condition)

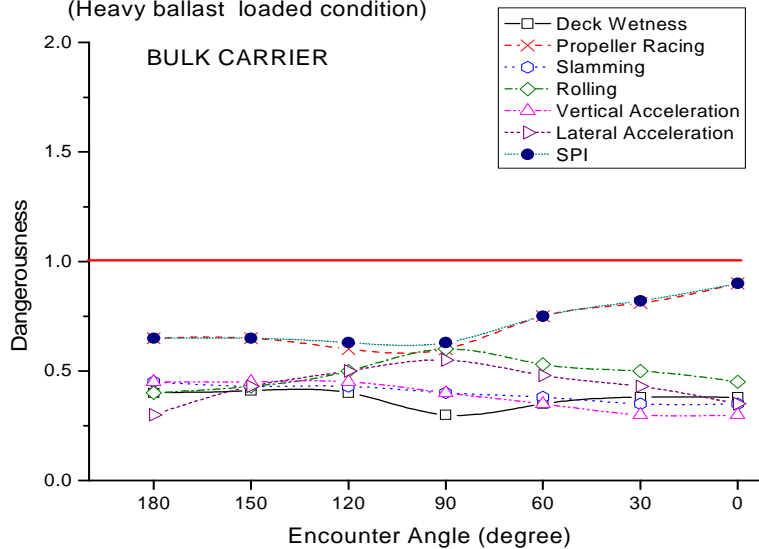


Fig. 2-18 Seakeeping performance index of bulk carrier(heavy ballast)

Sea State 8  $F_n=0.15(14.7\text{kts})$  in still water  
(Heavy ballast loaded condition)

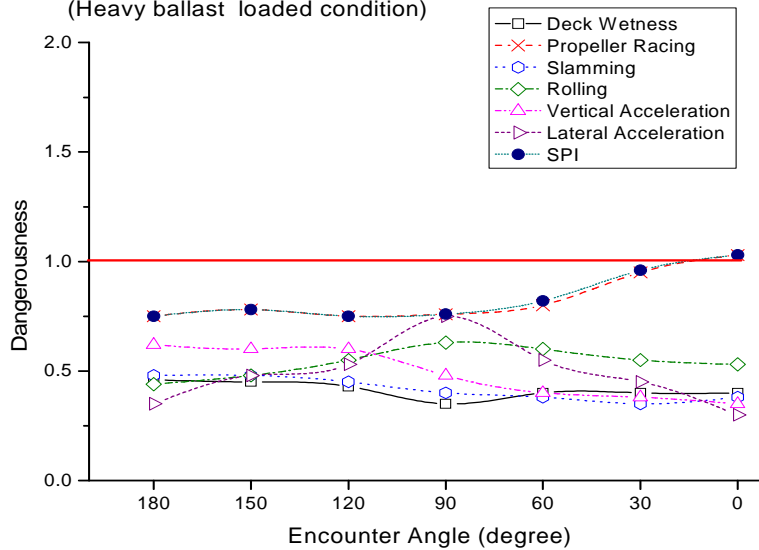


Fig. 2-19 Seakeeping performance index of bulk carrier(heavy ballast)

Sea State 7  $F_n=0.125(12.2\text{kts})$  in still water  
(Normal ballast loaded condition)

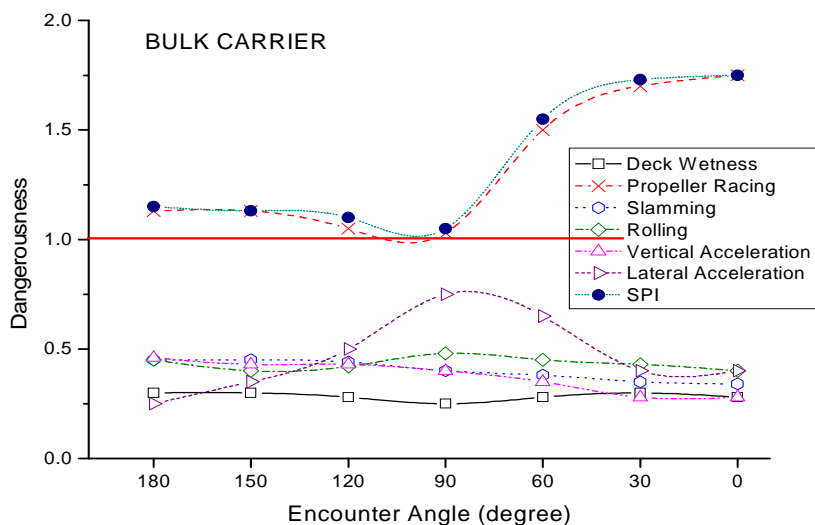


Fig. 2-20 Seakeeping performance index of bulk carrier(normal ballast)

Sea State 7  $F_n=0.15(14.7\text{kts})$  in still water  
(Normal ballast loaded condition)

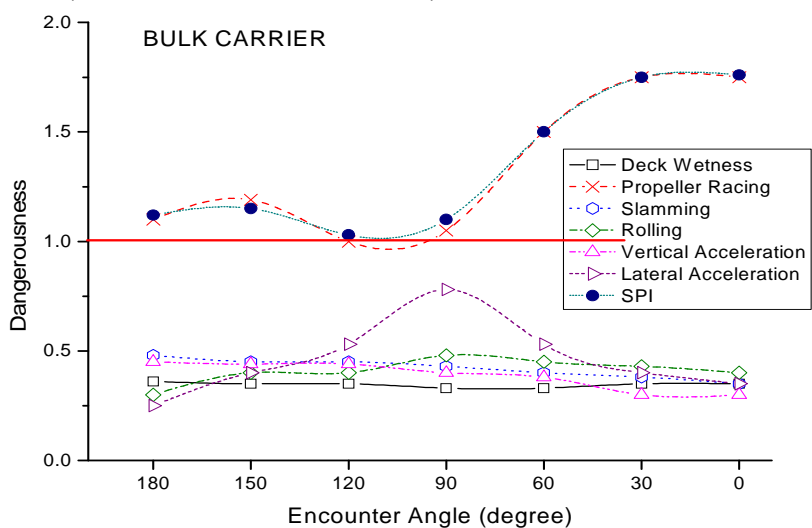


Fig. 2-21 Seakeeping performance index of bulk carrier(normal ballast)



## 제 3 장 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템

### 3.1 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 시스템은 기존의 내항성능 평가 방법상의 문제점을 개선하고 평가요소 계측상의 어려움을 해결할 수 있는 평가 방법으로, 임의의 대표 요소 한 가지에 의한 선박 전체의 항해안전성 평가 즉, 내항성능 평가요소 중 계측이 편리하고, 화물의 안전과 승조원의 작업성 등에 직접적인 영향을 미쳐 선박운항자가 감각적인 면에서 정량화 된 평가요소로 채택하기 쉬운 선체 상하가속도만을 계측하여[64] 선박의 종합적인 항해안전성을 평가할 수 있는 것이다.

이를 위하여 항해안전성 평가시스템은, 선박에 설치하여 선체의 운동에 의해 발생하는 상하방향의 가속도를 측정하는 상하가속도 측정기와, 상하가속도 측정기를 초기화시킨 후 상기 상하가속도 측정기를 통해 측정된 상하방향의 가속도를 전송 받아 상하가속도의 분산치를 계산하고, 계산된 분산치와 운항자로부터 입력받은 적재 상태 및 해상조건을 이용하여 선박의 항해안전성을 평가하는 내항성능지표를 계산하는 컴퓨터를 포함한다.

구체적으로 살펴보면, 컴퓨터는 선박의 항해안전성을 평가하기 위한 내항성능지표 프로그램이 탑재되어 있으며, 이 프로그램은 상하가속도의 영점조정을 위해 상하가속도 측정기를 초기화시킨 다음, 상하가속도 측정기로부터 전송받은 상하가속도를 토대로 분산치를 계산하고, 계산된 분산치와 적재 상태 및 해상조건을 이용하여 상하가속도에 대한 각 내항성능 평가요소의 상대위험도를 계산하는 서브루틴 프로그램도 포함하고 있다.

또한, 계산된 상대위험도를 이용하여 각 내항성능 평가요소의 변환 평가치와 그 한계평가치를 계산한 후 계산된 변환평가치와 그 한계평가치에 대한 비로서 계산된 다차원 내항성능 평가요소를 고려한 내항성능지표를 바탕으로 항해안전성 평가도 및 항해안전성 경과도를 모니터 화상 처리 공간상에 표시되도록 한 것을 특징으로 한다.

이러한 특징에 대한 단계별 부가 설명으로,

- (a) 상하가속도의 영점조정을 위해 상하가속도 측정기를 초기화시키는 단계;
- (b) 상기 (a)단계에서 초기화된 상하가속도 측정기로부터 감지된 선박의 상하가속도에 대한 신호를 전송받아 소정시간에 이르면 상하가속도의 분산치를 계산하는 단계;
- (c) 운항자로부터 선박의 적재 상태 및 해상조건을 입력받는 단계;
- (d) 상기 (b)단계를 통해 계산된 상하가속도의 분산치와 (c)단계를 통해 입력 받은 선박의 적재 상태 및 해상조건을 토대로 상하가속도에 대한 각 내항성능 평가요소의 상대위험도를 계산하고, 계산된 상대위험도를 이용하여 계산된 각 내항성능 평가요소의 변환 평가치와 그 한계 평가치를 사용하여 내항성능지표를 계산하는 단계;
- (e) 상기 (d)단계를 통해 계산된 내항성능지표를 토대로 항해안전성 평가도 및 항해안전성 경과도를 모니터의 화상 처리 공간상에 표시되도록 하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

Fig. 3-1은 선박의 항해안전성 평가시스템의 전체적인 구성을 설명하기 위한 블록도이다.

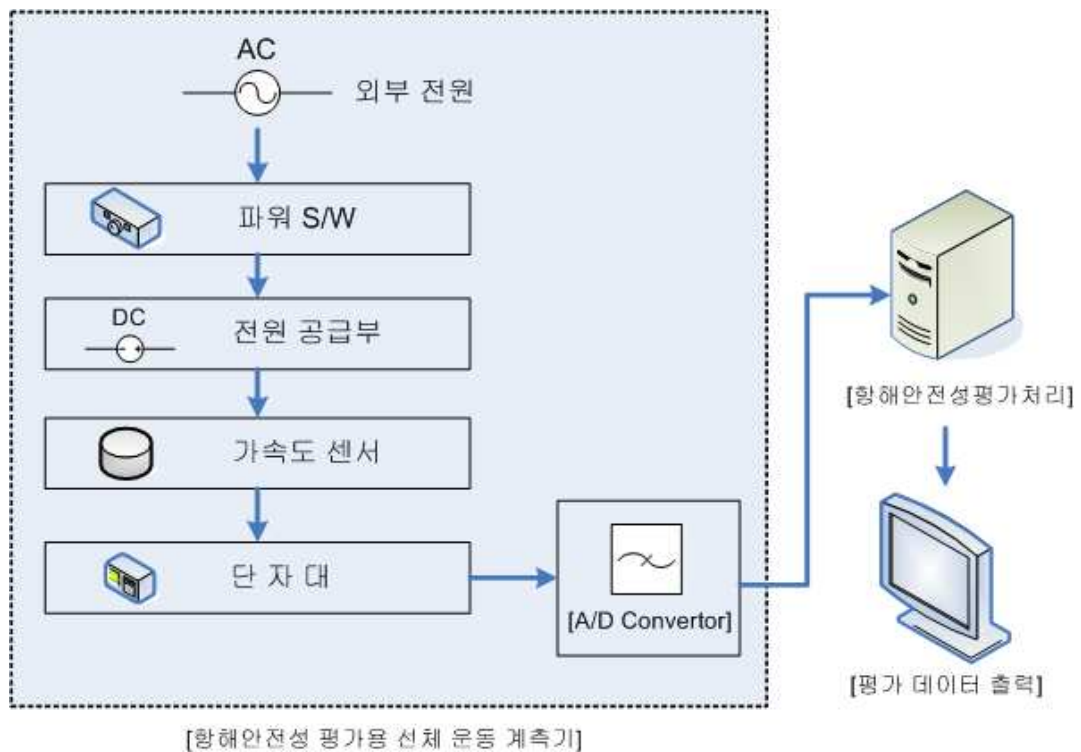


Fig. 3-1 Flow chart of the measurement and analysis system

### 3.2 선체 상하가속도 계측장치

본 연구에서는 선박에 설치하여, 선체의 동요에 의해 발생하는 상하방향의 가속도량을 측정하는 상하가속도 계측장치를 사용하였다. 이는 전원공급장치, 상하가속도 센서, 단자대 및 A/D 컨버터로 구성되는 상하가속도 측정기를 포함한다. 상하가속도 측정기는 파워 온/오프 스위치가 파워 온 된 경우, 외부로부터 전원을 인가받아 소정의 전압 레벨로 변환시키기 위한 전원공급부, 선체의 6자유도 운동의 정도에 따라 발생하는 상하방향 가속도를 감지하는 상하가속도 센서, 전원공급부를 통해 인가된 전압이 상하가속도 센서로 공급되도록 하고, 상하가속도 센서를 통해 감지된 상하방향 가속도에 대한 신호를 전송하

기 위해 외부와 연결되도록 하는 단자대 및 단자대와 연결되어, 상하가속도 센서를 통해 감지된 상하방향 가속도에 대한 신호를 디지털신호로 변환하여, 변환된 신호를 전송 받은 컴퓨터로부터 상하방향 가속도에 대한 신호를 토대로 선박의 가속도 값이 계산되도록 하는 A/D 컨버터로 구성된다.

Fig. 3-2는 본 개발의 실시 예에 따른 상하가속도 측정 시스템의 구성을 상세히 나타낸 도면으로, 도면 주요 부분에 대한 부호의 설명은 다음과 같다.

- |                  |               |
|------------------|---------------|
| 10 : 상하가속도 측정기   | 11 : 전원공급부    |
| 12 : 파워 온/오프 스위치 | 13 : 상하가속도 센서 |
| 14 : 단자대         | 15 : A/D 컨버터  |

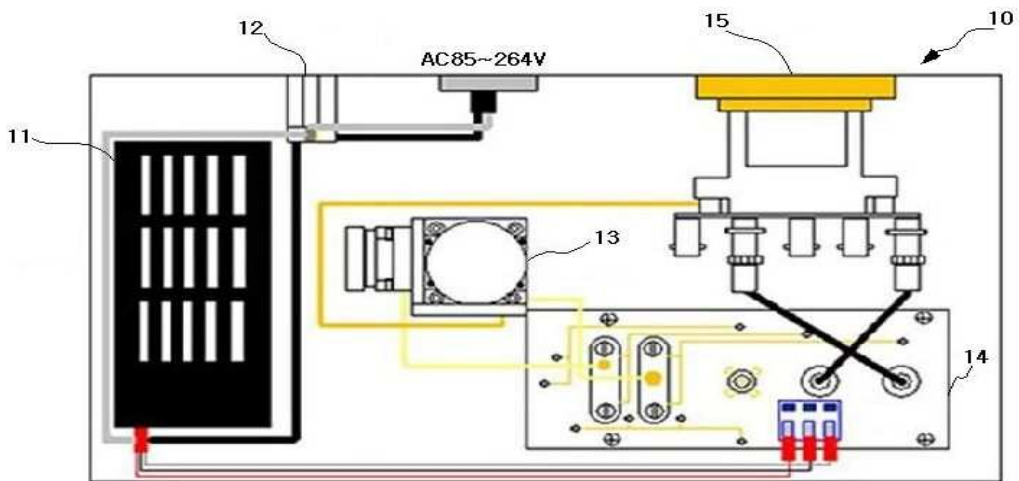


Fig. 3-2 Internal apparatus of the vertical acceleration measuring system

상하가속도 측정기(10)에 대해 Fig. 3-2를 참조하여 설명하면, 상하가속도 측정기(10)는 전원공급부(11), 파워 온/오프 스위치(12), 상하가속도 센서(13), 단자대(14) 및 A/D 컨버터(15) 등을 포함한다. 이때, 상하가속도 측정기(10)를 선박에 설치하여 실제 해상에서의 상하가속도를 계측한다.

전원공급부(11)는 파워 온/오프 스위치(12)가 파워 온 된 상태에서 외부로부터 인가된 전압(예를 들면, AC 85-264V)이 공급되면, 공급된 전압을 소정의 전압 레벨(예를 들면, DC  $\pm 15V$  등과 같은)로 변환시켜 후술하는 상하가속도 센서(13)로 공급한다.

상하가속도 센서(13)는 파워 온/오프스위치(12)를 통해 변환된 소정전압을 인가 받은 후, 선체의 6자유도 운동의 정도에 따라 발생하는 상하방향 가속도를 감지한다. 그러면, 단자대(14)는 파워 온/오프 스위치가 파워 온 된 상태에서 전원공급부(11)를 통해 소정전압이 상하가속도 센서(13)로 공급되도록 하는 터미널 역할을 수행한다. 또한, 단자대(14)는 상하가속도 센서(13)를 통해 감지된 상하방향 가속도에 대한 신호를 전송하기 위해 후술하는 A/D 컨버터(15)와 연결되도록 하는 터미널 역할을 수행한다.

A/D 컨버터(15)는 단자대(14)와 연결되어, 상하가속도 센서(13)를 통해 감지된 상하방향 가속도에 대한 신호는 단자대(14)와 연결된 A/D컨버터(15)를 통하여 디지털신호로 변환하고 외부(예를 들면, 컴퓨터)로 전송된다. 그리하여, A/D 컨버터(15)를 통해 전송받은 상하방향 가속도에 대한 신호를 토대로 선박의 가속도 값이 계산되도록 한다. 이때, 계산된 선박의 가속도 값만으로 선박의 종합적인 항해안전성을 평가할 수 있다.

컴퓨터는 A/D 컨버터(15)를 통해 전송받은 상하방향 가속도에 대한 신호를 토대로 선박의 상하가속도 평균치 및 분산치가 계산되도록 한다. 이때, 계산된 선박의 상하가속도 평균치 및 분산치로 선박의 종합적인 항해안전성을 평가할 수 있다.

먼저, 컴퓨터는 환경설정파일(CFG file)을 사용하여 상하가속도 측정기(10)의 초기화(상하가속도의 영점조정)를 수행한 후 초기화가 완료되면, 상하가속도가 저장될 파일을 입력받아 A/D컨버터(15)를 통해 변환된 상하가속도의 디

지텔 입력신호가 미리 입력되어 있는 눈금 측정값에 의하여 중력가속도에 상응하는 값으로 변환되어 모니터 화면상에 시계열 데이터로서 표시되도록 한다. 또한, 컴퓨터는 모니터 화면상에서 상하가속도 초기의 입력신호가 영점이 지시되면 계측을 계속하고, 계측시간이 소정시간(예를 들면, 10분)에 도달되면 계측이 완료되도록 한다. 이때, 상하가속도 신호의 계측간격은 100ms이다.

이 후, 컴퓨터는 상하가속도를 통계 처리할 수 있는 소정의 프로그램(예를 들면, 상하가속도 통계 처리 프로그램)을 이용하여 상하가속도의 평균치 및 분산치를 계산하고, 상기 상하가속도의 계측시간, 각 시간에 대한 가속도 값을 파일에 저장시 완료되면 내항성능 평가 입력항목으로서 계측된 상하가속도의 분산치가 자동적으로 입력된다.

### 3.3 선박 내항성능 계산 프로그램 및 항해안전성 평가 화상처리

Fig. 3-1에 나타낸 시스템의 컴퓨터는 상하가속도를 통계 처리할 수 있는 소정의 프로그램(예를 들면, 상하가속도 통계 처리 프로그램)을 이용하여 상하가속도의 평균치 및 분산치를 계산하고, 상하가속도의 계측시간, 각 시간에 대한 가속도 값을 파일에 저장시 완료되면 내항성능 평가 입력항목으로서 계측된 상하가속도의 분산치가 Fig. 3-3에 나타낸 바와 같이 자동적으로 입력된다.

여기서, 선박운항자가 선박의 적재 상태 및 현재의 해상조건(예를 들면, 진풍향, 진풍속, 선박의 속력 및 선박의 침로 등과 같은)을 입력장치(예를 들면, 키보드, 마우스 등)를 통해 입력하게 되면(Fig. 3-4 참조), 컴퓨터는 내항성능을 평가할 수 있는 소정 프로그램(예를 들면, 내항성능 평가 프로그램)에 의하여 선박의 변환 평가치 및 그 한계 평가치를 사용하여 선박의 종합적인 항해안전성을 평가하는 내항성능지표를 계산하게 된다. 선박의 변환 평가치 및 그 한계

평가치를 사용하여 선박의 종합적인 항해안전성을 평가하는 내항성능지표를 토대로 항해안전성 평가도 및 항해안전성 경과도를 출력함으로써 선박운항자가 시각적으로 쉽게 항해안전성을 평가할 수 있다.

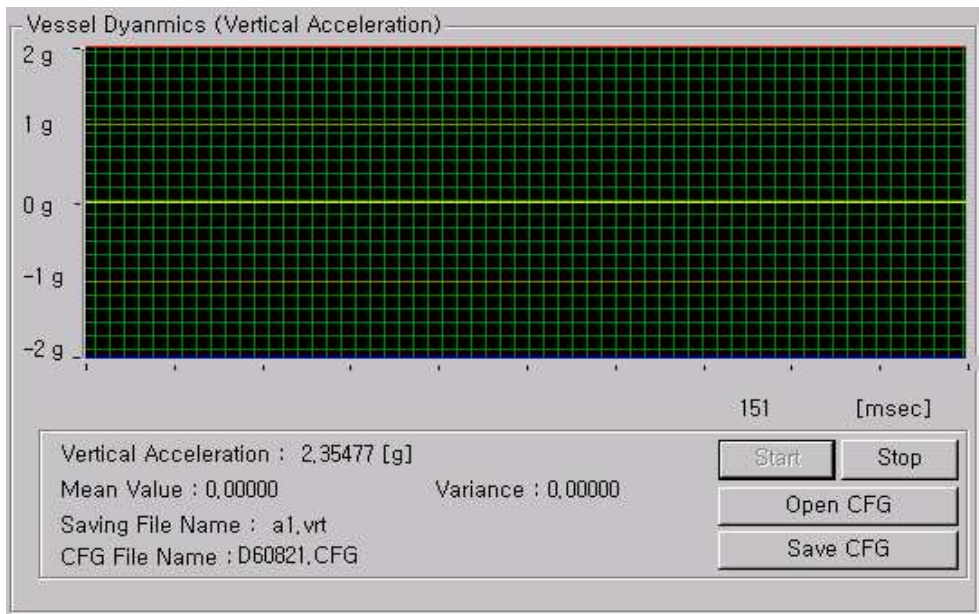


Fig. 3-3 Display for the input signal of vertical acceleration

INPUT & RESULT

INPUT

WIND DIRECTION 0  
SHIP COURSE 0  
LOAD CONDITION Ballast  
TRUE WIND SPEED ( 7 ~ 54 KTS) 7  
SHIP SPEED(KTS) 0

Results

AV VARIANCE 0.00014

ISPI

0.049727

RUN

Fig. 3-4 Display for the input of ship and sea condition

Fig 3-5는 선박의 종합내항성능 평가 방법을 설명하기 위한 동작 흐름도로  
서, Fig. 3-5를 참조하여 내항성능 평가방법을 설명하면, Fig. 3-1의 컴퓨터는  
환경설정파일(CFG file)을 사용하여 상하가속도 측정기(10)의 초기화(상하가속  
도의 영점조정)를 수행한다(S100). 이 후, 컴퓨터는 상하가속도 측정기(10)의  
A/D 컨버터(15)를 통해 전송 받은 선체의 상하가속도에 대한 신호를 토대로  
상하가속도의 평균치 및 분산치를 계산하도록 하는 상하가속도 계산 서브루틴  
을 수행한다(<Fig. 3-5의 S200).

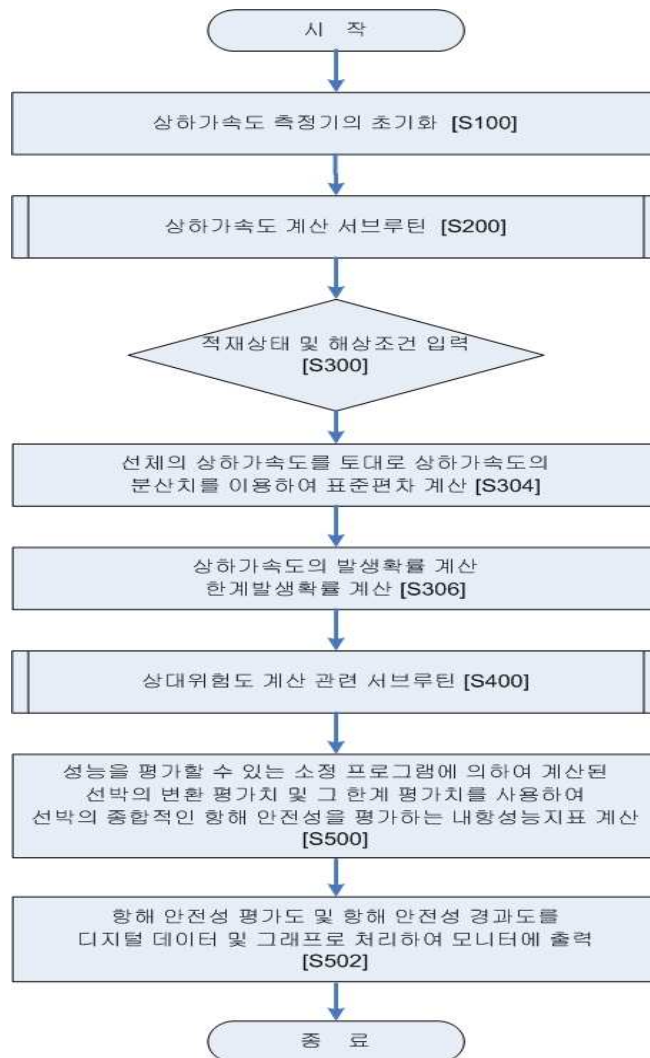


Fig. 3-5 Flow chart for explanation of navigational safety evaluation



상하가속도 계산 서브루틴(S200)을 Fig. 3-6을 참조하여 상세하게 설명하면, 컴퓨터는 상하가속도 측정기(10)로부터 감지된 선체의 상하가속도에 대한 신호를 전송 받는다(S201). 그 후, 컴퓨터는 상하가속도 초기의 입력신호가 영점인지 여부를 판단한다(S203). 상기 S203 단계의 판단 결과, 상하가속도 초기의 입력신호가 영점이면 감지된 신호를 전송 받아 계측이 이루어지도록 하는 상술한 S201 단계로 프로세스를 이동한다. S203 단계의 판단 결과, 상하가속도 초기의 입력신호가 영점이 아니면, 계측시간이 10분에 도달되었는지 여부를 판단한다(S205). S205 단계의 판단 결과, 계측시간이 10분에 도달되지 않은 경우, 소정시간 대기 상태를 유지한다.

여기서, 상하가속도의 디지털 입력신호가 미리 입력되어 있는 눈금 측정값에 의하여 중력가속도에 상응하는 값으로 변환되어 Fig. 3-3에 도시된 바와 같이 모니터 화면상에 시계열 데이터로서 표시되도록 한다.

S205 단계의 판단 결과, 계측시간이 10분에 도달된 경우, 컴퓨터는 전송 받은 상하가속도를 토대로 선박의 상하가속도 평균치 및 분산치가 계산되도록 한다(S207). 이 후, 컴퓨터는 운항자로부터 키보드 및 마우스 등과 같은 입력장치(미도시)를 통해 적재 상태(예를 들면, Full loaded condition, Half loaded condition, Ballast loaded condition 등) 및 해상 조건(예를 들면, 진풍향, 진풍속, 선박의 속력 및 선박의 침로 등)이 입력되었는지 여부를 판단한다(S300). S300 단계의 판단 결과, 운항자로부터 적재 상태 및 해상 조건이 입력되지 않은 경우, 소정시간 대기 상태를 유지한다. 또한, S300 단계의 판단 결과, 운항자로부터 적재 상태 및 해상 조건이 입력된 경우, 컴퓨터는 상기 상하가속도 측정기(10)로부터 전송된 선체의 상하가속도를 토대로 자동 계산되어 입력된 상하가속도의 분산치를 이용하여 표준편차를 계산한다(S304).

그리고 컴퓨터는 상기 계산된 표준편차를 이용하여 내항성능 평가요소의 한계치( $X_{ic}$ )를 넘을 확률인 한계발생확률( $Q_{X_{ic}}$ )이 계산되도록 한다(S306). 이 후, 상기 컴퓨터는 적재 상태, 해상 조건, 파향 및 현재 선속이 입력되었는지 여부를 판단하고, 판단 결과 적재 상태, 해상 상태, 파향 및 현재 선속 모두 입력된

경우 각 내항성능 평가요소의 상대위험도를 계산하는 상대위험도 계산 관련 서브루틴을 수행한다(Fig. 3-5의 S400).

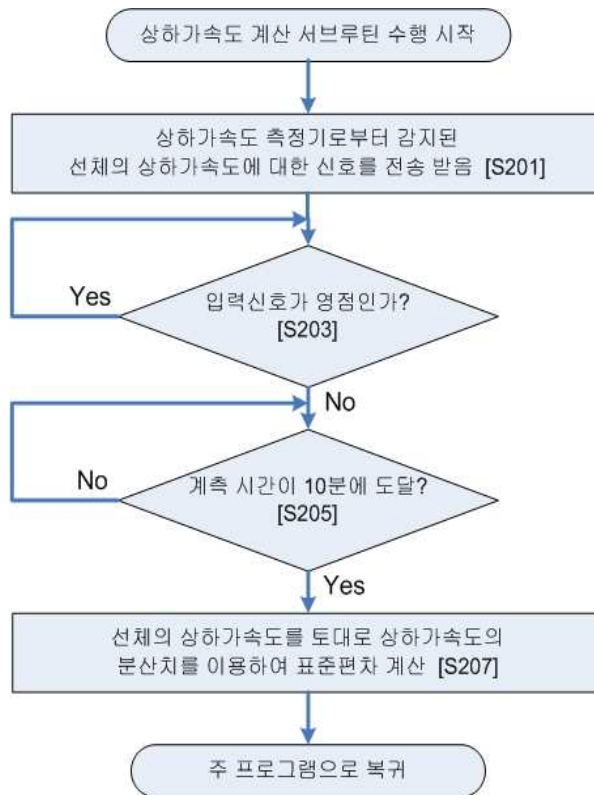


Fig. 3-6 Flow chart for explanation of calculation subroutine of vertical acceleration

상대위험도 계산 관련 서브루틴(S400)을 Fig. 3-7을 참조하여 설명하면, 컴퓨터는 적재 상태(예를 들면, Full loaded condition, Half loaded condition, Ballast loaded condition)가 입력되었는지 여부를 판단한다(S401).

S401 단계의 판단 결과, 적재 상태가 입력되지 않은 경우, 소정시간 대기 상태를 유지한다. 또한, S401 단계의 판단 결과, 적재 상태가 입력된 경우, 상기 컴퓨터는 해상 상태(예를 들면, B.F. No. 3-10)가 입력되었는지 여부를 판단한다(S403).

S403 단계의 판단 결과, 해상 상태가 입력되지 않은 경우, 소정시간 대기 상태를 유지한다. S403 단계의 판단 결과, 해상 상태가 입력된 경우, 컴퓨터는 파

향(예를 들면, 180°~ 000°, 10°간격)이 입력되었는지 여부를 판단한다(S405).

S405 단계의 판단 결과, 파향이 입력되지 않은 경우, 소정시간 대기 상태를 유지한다.

S405 단계의 판단 결과, 파향이 입력된 경우, 컴퓨터는 현재 선속(예를 들면, Knots)이 입력되었는지 여부를 판단한다(S407).

S407 단계의 판단 결과, 상기 컴퓨터는 현재 선속이 입력되지 않은 경우, 소정시간 대기 상태를 유지한다. S407 단계의 판단 결과, 컴퓨터는 현재 선속이 입력된 경우, 컴퓨터는 해당 조건을 토대로 각 내항성능 평가요소의 상대 위험도가 계산되도록 한다(S409).

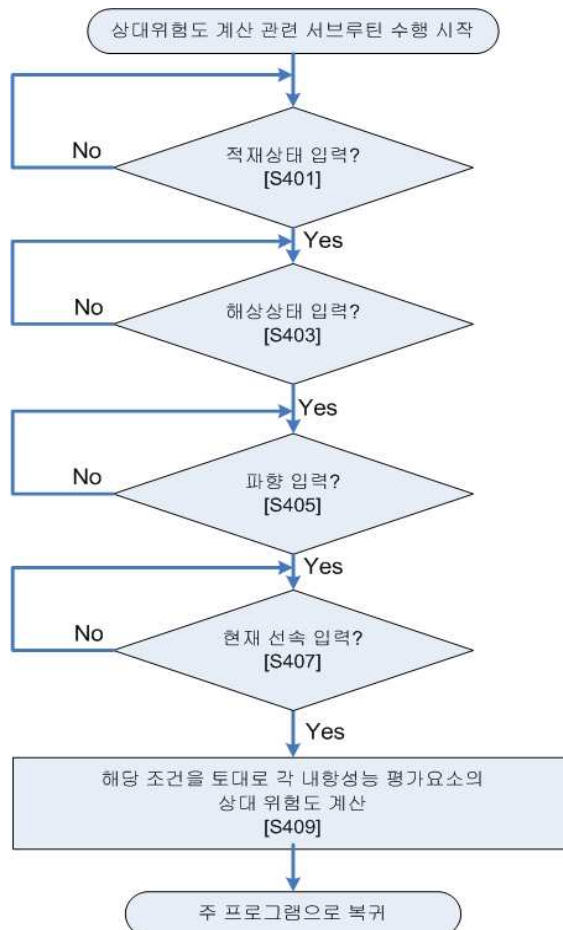


Fig. 3-7 Flow chart for explanation of calculation subroutine of relative dangerousness

이 후, 컴퓨터는 내항성능을 평가할 수 있는 소정 프로그램(예를 들면, 내항 성능 평가 프로그램)에 의하여 계산된 선박의 변환 평가치 및 그 한계 평가치를 사용하여 선박의 종합적인 항해안전성을 평가하는 내항성능지표가 계산되도록 한다(S500). 그리고 컴퓨터는 계산된 내항성능지표를 토대로 항해안전성 평가도 및 항해안전성 경과도를 모니터의 화상 처리 공간상에 표시되도록 한다(S502)(Fig. 3-8 및 Fig. 3-9 참조).

마지막으로 컴퓨터는 선박운항자가 항해안전성을 모니터의 화상 처리 공간상에서 시각적으로 쉽게 판단할 수 있도록 하기 위하여 Fig. 3-8에 도시된 바와 같이 현재의 상태를 항해안전성 평가도를 이용하여 출력하고, Fig. 3-9에 도시된 바와 같이 항해안전성 경과도를 출력하여 위험 상태를 벗어나기 위해서 필요로 하는 조치(예를 들면, 변침, 선속 조정 등과 같은 정량적인 데이터)를 제공할 수 있도록 한다.

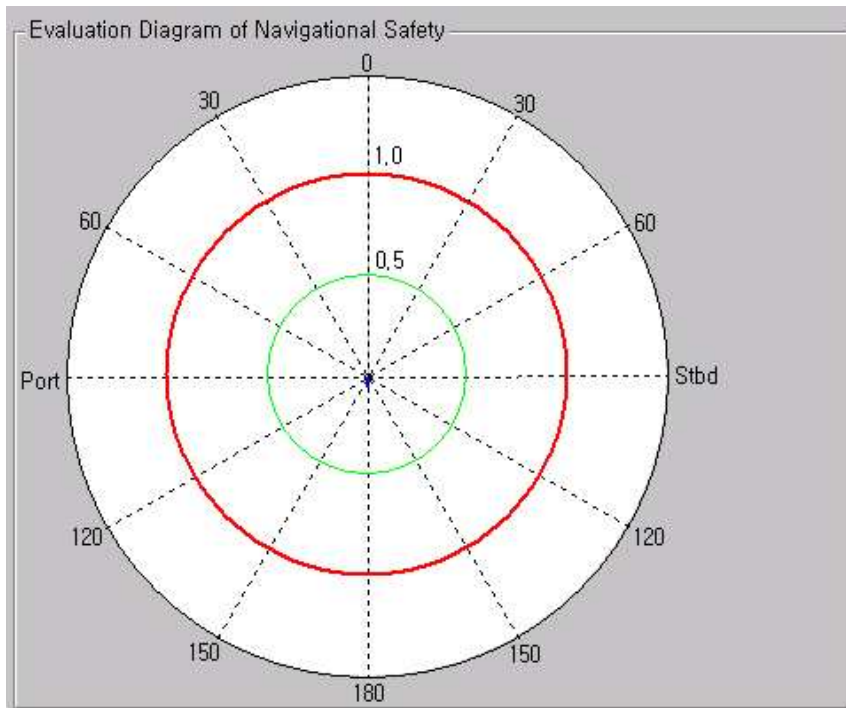


Fig. 3-8 Display for the evaluation diagram of navigation safety

Fig. 3-8의 항해안전성 평가도에 표시되는 수치는 현재 상태에 있어서의 내항성능지표이며, Heading이 0°일 경우 선수방향이며 Heading이 180°일 경우 선미를 나타낸다. 붉은 색으로 나타낸 원은 내항성능지표가 1인 경우를 표시하고 있으며 화살표의 벡터 크기로 표시되는 내항성능지표의 수치가 이 원을 넘으면 선박 전체의 항해안전성은 위험하게 되는 것을 의미한다.

또한, Fig. 3-9의 항해안전성 경과도에 표시하는 수치도 내항성능지표의 계산 값으로서, 이것은 현재 상태의 내항성능지표 뿐만 아니라 과거에서 현재까지의 내항성능지표를 표시하는 화상처리 공간이다. 이 공간에 부가적으로 포함되는 내용으로서는 내항성능지표가 작성된 일시와 그 당시의 적재 상태 및 해상조건이 파일로서 저장할 수 있도록 되어 있다.

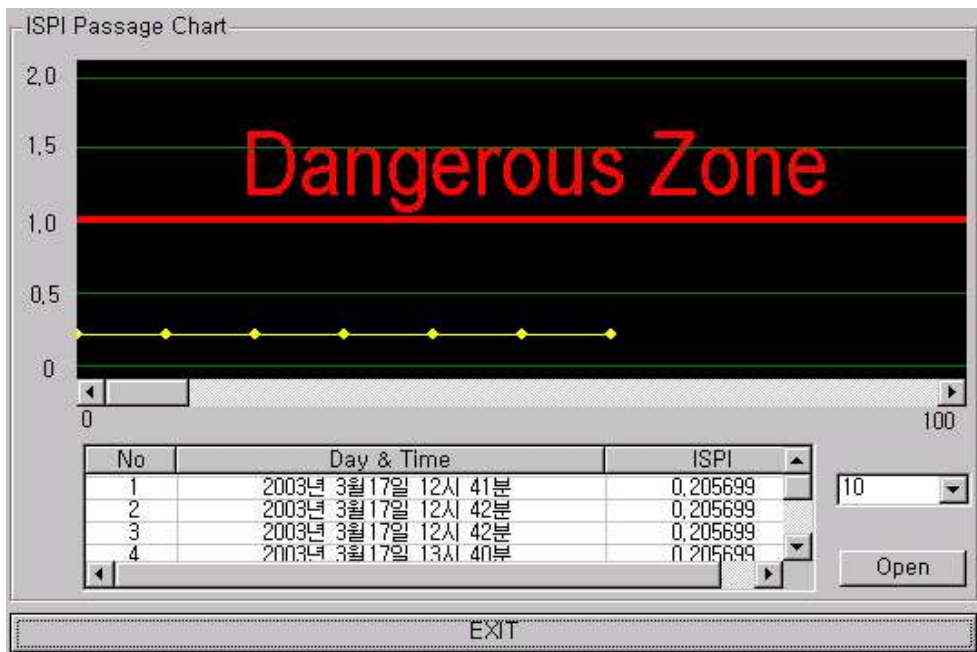


Fig. 3-9 Display for the SPI passage chart

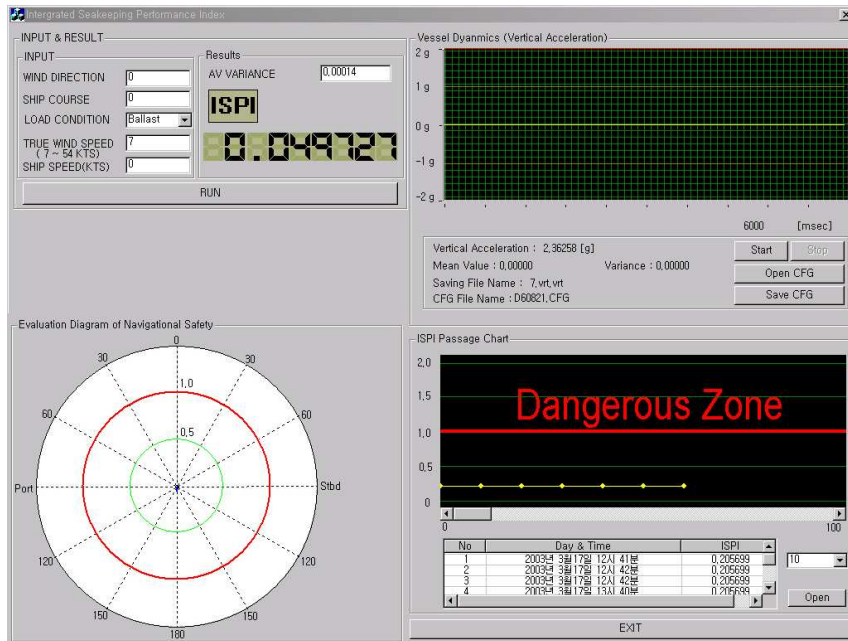


Fig. 3-10 Display for the navigation safety evaluation system

Fig. 3-10은 선박운항자가 시각적으로 쉽게 항해안전성을 평가할 수 있도록 선체가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템의 실제 출력화면이다. 왼쪽 윗부분에는 선박운항자가 입력한 선박의 적재 상태 및 풍향, 풍속, 선속, 침로 등 선박운항과 관련된 현재의 해상조건과 계측기와 컴퓨터로부터 계산되어진 선체 운동으로 인한 상하가속도의 분산치와 내항성능평가지표를 나타낸다. 오른쪽 윗부분에는 계측된 상하가속도의 분산치가 자동적으로 입력되는 것이다.

화면의 왼쪽 아랫부분은 현재의 상태를 항해안전성 평가도를 이용하여 출력하여 위험 상태를 벗어나기 위해서 필요로 하는 조치(예를 들면, 변침, 선속 조정 등과 같은 정량적인 데이터)를 제공할 수 있도록 한다. 오른쪽 아랫부분은 현재 상태의 내항성능지표뿐만 아니라 과거에서 현재까지의 내항성능지표를 표시하는 화상처리 공간으로 내항성능지표가 작성된 일시와 그 당시의 적재 상태 및 해상조건이 파일로서 저장할 수 있도록 되어 있다.

## 제 4 장 실선 계측을 통한 항해안전성 평가

실선 실험은 선체 상하가속도 계측 방법에 관한 실험과 선박 항해안전성 평가시스템 실험 등으로 2회에 걸쳐 실시되었다. 아래에 각각의 실선 실험의 개요, 방법 및 결과를 기술한다.

### 4.1 선체 상하가속도 계측 실선 실험

#### 4.1.1 실험 개요

선박의 항해안전성 평가시스템에서 선체 상하가속도 계측장치는 중요한 하드웨어의 하나이며, 특히 상기 시스템은 다차원 내항성능 평가요소 중에서 한 개의 평가요소만을 계측하고, 이 평가요소의 분산치를 사용하여 선박의 종합적인 항해안전성을 평가하는 내항성능지표를 계산하기 때문에 상하가속도에 대한 적절한 계측시간 및 계측간격 등의 설정이 요구되어진다.

본 연구의 실험 대상선박은 여객선형인 한국해양대학교 실습선 한나라호이며, 2002년 하반기 원양항해 기간 중, 선체 상하가속도 계측장치 및 계측된 상하가속도의 분산치를 구하기 위한 통계처리 시스템을 탑재하여 실선 실험을 시행하였다. 실선 실험에 사용한  $L_{pp} = 93\text{m}$ 의 여객선형인 실습선 ‘HANNARA’의 선도와 주요 목은 Fig. 4-1과 Table 4-1에 나타낸다. 적재 상태는 Half loaded condition이었다. 자세한 원양 항해 일정을 Table 4-2에 나타낸다.

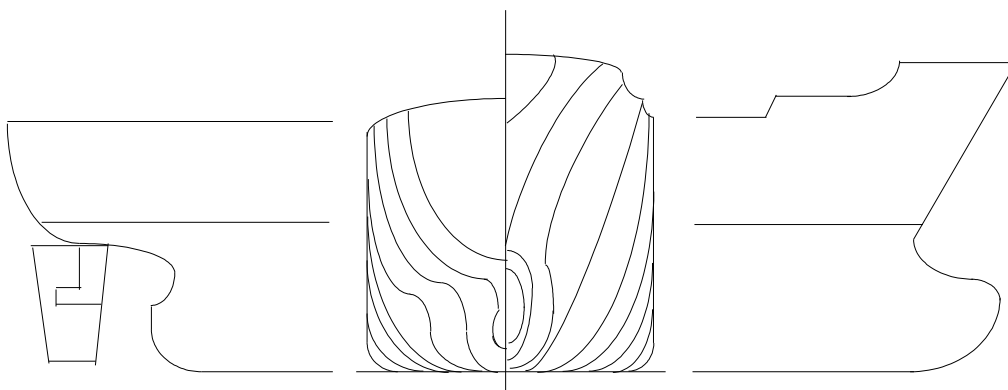


Fig. 4-1 Lines of T/S 'HANARA'

Table 4-1 Principal particulars of T/S 'HANARA'

ITEM	CONDITION	FULL LOADED CONDITION	HALF LOADED CONDITION	BALLAST LOADED CONDITION
Length P.P.	(m)	93	93	93
Breadth	(m)	14.5	14.5	14.5
Depth	(m)	7	7	7
Mean Draft	(m)	5.256	4.972	4.514
Displacement	(Ton)	4,427.52	4116.72	3635.26
Block Coefficient		0.6028	0.6028	0.6028
L.C.G	(m)	-1.205	-0.825	-0.590
V.C.G.	(m)	5.077	5.160	5.550
GM	(m)	1.317	1.225	0.900



Table 4-2 Seagoing navigation schedule of T/S 'HANARA'

항구명	입항일시	거 리 (Mile)	항해일수
	출항일시		
BUSAN	.	926	2d-23h
	2002. 10. 04 11:00		
NAGOYA	2002. 10. 07 10:00	1268	4d-00h
	2002. 10. 10 10:00		
SHANGHAI	2002. 10. 14 10:00	2510	8d-01h
	2002. 10. 17 09:00		
SINGAPORE	2002. 10. 25 10:00	1605	4d-23h
	2002. 10. 28 10:30		
CEBU	2002. 11. 02 09:30	1632	6d-01h
	2002. 11. 05 09:00		
BUSAN	2002. 11. 11 10:00		
합 계		7941	26d-00h

본 실험에 사용된 가속도 센서는 Fig. 4-2에서와 같이 진동질량  $m$ 이 센서 패키지 안의 스프링에 의해 매달려 있는 구조로 모델링 할 수 있는 기계식 센서이다. 이 센서가 가속도  $\mathbf{a}$ 에 의해 움직이게 되면, 관성력에 의해 진동 Mass의 상대적 변위  $\mathbf{x}$ 가 생기게 되고, 그것이 전기적 신호로 감지된다. 그 동작 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$m\ddot{\mathbf{x}} = m\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} + \lambda\frac{d\mathbf{x}}{dt} + k\mathbf{x} \quad (4-1)$$

여기서,  $k$ 는 스프링 상수,  $\lambda$ 는 Damping 상수

또한, 선체운동 가속도 계측·해석 시스템에 사용된 가속도 센서(I)의 주요 사양은 Table 4-3에 나타낸다.

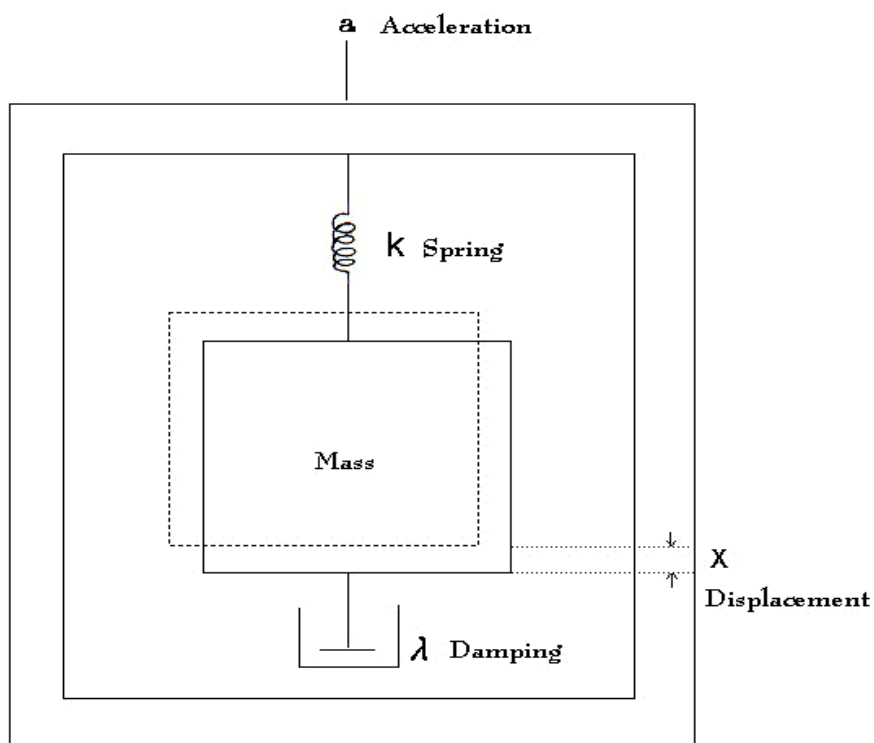


Fig. 4-2 Accelerometer principle

Table 4-3 Principal Specifications of the Accelerometer(1)

ITEMS	DIMENSION
Measured acceleration range	$\pm 2 \text{ g}$
Scale factor	$5 \text{ V/g}$
Operating temperature	$-50^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$
Power consumption	$0.5 \text{ W}$
Shock resistance	$30 \text{ g}$
Vibration strength within a range of up to 500 Hz	$5 \text{ g}$
Supply voltage	$\pm 15 \text{ V}$
Dimension	$38 \times 38 \times 25 \text{ (mm)}$
Mass	$115 \text{ (g)}$

#### 4.1.2 계측 방법

계측은 한나라호에 승선하고 있는 2등항해사 및 3등항해사에게 사전 교육 후 계측하도록 하였다. 계측방법은 매 4시간 당직 중 교대시간을 기준으로 약 2시간 계측을 행하였으며, 기상 악화 시 또는 기타 필요시 1시간 이상 샘플 계측도 하였다.

상가속도 계측장치의 설치장소는 대상선박인 한나라호의 학생 선교이며, 선수방향은 선체중심선상에, 좌우방향은 선체중심선과 수직이 되도록 설치하였다. 선체운동의 계측이라는 관점에서 가능한 선체중심에 장비를 설치하면 정확한 계측을 행할 수 있기 때문이다. 또한 선체의 심한 운동으로 인해 실험장치의 동요가 생기지 않도록 고정을 하였다.

본 시스템에서 행하는 통계처리는 각 파일당의 상가속도 계측치의 평균 및 분산치이며, 저장을 시작한 때로부터 최종 파일에 이르기까지의 평균, 분산치를 계산하여 파일의 끝에 표시한다. 이 때 데이터의 계측 간격은 100ms로 설정하였으며, 계측 데이터 저장 시간은 10분 간격 및 20분 간격의 2종류를 선택하였고 각각 80개 정도의 계측을 수행하였다. 그리고 가속도 계측 시 참고로 기록한 항목으로는 선박위치, 침로, 선속, 진폭향, 진폭속 등이 있으며, 이를 정리하여 Table 4-4에 나타낸다. 저장파일명은 파일의 구분이 쉽도록 계측시작 당시의 월, 일, 시간, 분을 사용하여 작성하였다.

Table 4-4 Principal articles with measuring vertical acceleration

저장파일명	저장 시간	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진폭향 (Deg.)	진폭속 (Kts)
10041700	10분	33° 48 '	128° 50 '	260	14.0	260	15
10041800	20분	33° 40 '	128° 46 '	200	13.8	260	15
10042000	10분	33° 15 '	128° 35 '	210	13.0	260	10

저장파일명	저장 시간	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진풍향 (Deg.)	진풍속 (Kts)
10042100	20분	33° 01 '	128° 28 '	190	13.5	260	10
10042300	10분	32° 25 '	128° 27 '	175	14.0	220	10
10050500	10분	31° 27 '	129° 32 '	160	14.7	220	10
10050600	20분	31° 15 '	129° 36 '	160	14.5	200	10
10051000	10분	30° 54 '	130° 40 '	110	15.0	150	8
10051100	20분	30° 59 '	130° 55 '	050	15.3	120	8
10051200	10분	31° 08 '	131° 08 '	060	15.3	100	5
10051300	20분	31° 17 '	131° 27 '	060	14.0	080	5
10051600	10분	31° 15 '	132° 05 '	060	14.0	140	10
10051700	20분	31° 44 '	132° 20 '	060	14.0	140	10
10052000	10분	32° 06 '	133° 07 '	065	14.7	140	10
10052200	20분	32° 21 '	133° 44 '	065	14.7	140	10
10060100	10분	32° 43 '	134° 30 '	060	15.0	140	20
10060200	20분	32° 55 '	134° 58 '	060	16.5	140	20
10060500	10분	33° 03 '	135° 17 '	240	11.5	140	20
10060600	20분	32° 55 '	135° 02 '	240	12.7	140	20
10060800	10분	32° 44 '	134° 37 '	240	12.0	140	15
10060900	20분	32° 27 '	134° 22 '	240	12.0	140	15
10061200	10분	32° 34 '	134° 09 '	060	15.0	140	15
10061300	20분	32° 31 '	134° 00 '	060	15.0	140	25
10061700	10분	33° 11 '	135° 34 '	060	15.0	180	25
10061800	20분	33° 20 '	135° 52 '	055	15.0	200	25
10062000	10분	33° 34 '	136° 15 '	045	15.0	200	25
10062100	20분	33° 44 '	136° 25 '	050	15.0	200	20
10101600	10분	33° 59 '	136° 37 '	225	15.0	000	20
10101800	20분	33° 39 '	136° 13 '	225	14.0	000	20
10102200	10분	33° 10 '	135° 27 '	240	12.0	000	15
10102300	20분	33° 04 '	135° 15 '	240	12.0	090	15
10110000	10분	32° 57 '	135° 01 '	265	12.0	025	20
10110200	20분	32° 47 '	134° 38 '	240	12.0	025	20
10110500	10분	32° 28 '	133° 59 '	240	12.0	025	20
10110600	20분	32° 21 '	133° 41 '	240	12.0	025	20
10110800	10분	32° 11 '	133° 18 '	240	12.0	025	20

저장파일명	저장 시간	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진풍향 (Deg.)	진풍속 (Kts)
10111000	20분	31° 57 '	132° 51 '	240	12.8	045	20
10111600	10분	31° 19 '	131° 29 '	240	12.0	045	20
10111700	20분	31° 11 '	131° 13 '	215	13.0	045	20
10120000	10분	31° 19 '	129° 39 '	340	14.0	090	15
10120200	20분	31° 43 '	129° 24 '	320	14.0	090	15
10120400	10분	32° 04 '	129° 00 '	320	14.0	090	15
10120500	20분	32° 17 '	128° 48 '	320	14.0	090	15
10121000	10분	33° 03 '	127° 49 '	310	14.0	135	10
10121100	20분	33° 11 '	127° 38 '	290	14.0	135	10
10121200	10분	33° 19 '	127° 25 '	320	14.0	135	10
10121300	20분	33° 30 '	127° 10 '	320	14.0	135	10
10121700	10분	33° 29 '	126° 08 '	225	15.0	230	10
10121800	20분	33° 17 '	126° 02 '	190	15.0	230	10
10122100	10분	33° 13 '	126° 51 '	075	15.0	230	10
10122200	20분	33° 17 '	127° 08 '	070	15.0	230	10
10130000	10분	33° 23 '	127° 40 '	080	13.0	230	10
10130300	20분	33° 14 '	126° 58 '	255	13.0	230	10
10130500	10분	33° 06 '	126° 28 '	255	13.0	230	10
10130700	20분	32° 57 '	125° 59 '	255	13.0	230	10
10130900	10분	32° 49 '	125° 24 '	290	14.0	330	10
10131000	20분	32° 44 '	125° 11 '	230	14.0	330	10
10131200	10분	32° 30 '	124° 43 '	230	14.0	025	10
10131300	20분	32° 18 '	124° 23 '	230	14.0	025	10
10131600	10분	31° 56 '	123° 58 '	230	13.0	045	10
10131800	20분	31° 43 '	123° 33 '	350	13.0	045	10
10132100	10분	31° 39 '	123° 23 '	180	13.0	045	10
10132300	20분	31° 27 '	123° 04 '	220	12.0	045	10
10171600	10분	31° 03 '	122° 18 '	070	12.0	090	20
10171800	20분	31° 02 '	125° 52 '	090	13.0	090	20
10180000	10분	30° 22 '	123° 39 '	165	13.0	135	20
10180300	20분	29° 44 '	123° 39 '	180	13.0	135	20
10180400	10분	29° 32 '	123° 37 '	190	13.0	135	25
10180500	20분	29° 21 '	123° 36 '	180	13.0	180	25

저장파일명	저장 시간	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진풍향 (Deg.)	진풍속 (Kts)
10181300	10분	27° 38 '	123° 32 '	180	13.0	180	15
10181400	20분	27° 23 '	123° 31 '	180	13.0	225	15
10181600	10분	26° 57 '	123° 28 '	180	13.0	225	15
10191700	20분	26° 46 '	123° 28 '	180	13.0	225	15
10190000	10분	25° 17 '	123° 00 '	210	13.0	225	15
10190200	20분	24° 54 '	122° 45 '	210	13.0	225	15
10190400	10분	24° 31 '	122° 33 '	190	13.0	225	10
10191300	10분	22° 30 '	122° 10 '	190	13.0	045	10
10191500	20분	22° 04 '	122° 06 '	190	13.0	240	10
10191600	10분	21° 53 '	122° 04 '	190	13.0	240	10
10191700	20분	21° 34 '	122° 00 '	230	13.0	240	10
10200000	10분	20° 30 '	120° 40 '	230	15.0	270	10
10200100	20분	20° 20 '	120° 38 '	230	14.0	045	10
10200400	10분	19° 54 '	119° 51 '	225	14.0	090	10
10200600	20분	19° 36 '	119° 33 '	225	14.0	090	10
10201400	10분	18° 08 '	117° 59 '	225	15.0	045	10
10201500	20분	18° 00 '	117° 51 '	225	15.0	045	10
10210000	10분	16° 30 '	116° 14 '	230	14.0	045	10
10210200	20분	16° 11 '	115° 53 '	230	14.0	045	10
10210400	10분	15° 53 '	115° 33 '	230	14.0	045	10
10210600	20분	15° 34 '	115° 13 '	230	14.0	045	10
10211400	10분	14° 39 '	114° 13 '	215	14.0	045	10
10220400	10분	13° 47 '	113° 20 '	230	14.0	045	10
10220700	20분	13° 17 '	112° 49 '	225	14.0	045	10
10220800	10분	13° 06 '	112° 39 '	230	15.7	045	10
10221000	20분	12° 45 '	112° 15 '	230	14.0	045	10
10221800	10분	11° 31 '	110° 56 '	215	14.0	045	15
10222000	10분	11° 35 '	110° 45 '	230	14.0	045	15
10222200	20분	10° 58 '	110° 23 '	210	13.0	045	10
10230500	10분	09° 37 '	109° 16 '	220	15.0	045	10
10230700	20분	09° 12 '	108° 59 '	240	15.0	045	10
10231000	10분	08° 39 '	108° 31 '	230	15.0	045	5
10231100	20분	08° 25 '	108° 23 '	205	15.0	045	5

저장파일명	저장 시간	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진풍향 (Deg.)	진풍속 (Kts)
10231800	10분	07° 20 '	107° 49 '	205	15.0	270	15
10200400	10분	19° 54 '	119° 51 '	225	14.0	090	10
10231900	20분	07° 03 '	107° 38 '	210	15.0	225	15
10232000	10분	06° 58 '	107° 34 '	210	15.0	225	10
10232300	20분	06° 18 '	107° 16 '	200	15.0	225	10
10240400	10분	05° 16 '	106° 37 '	210	14.0	300	10
10240500	20분	05° 25 '	106° 42 '	035	14.0	300	10
10241000	10분	04° 55 '	106° 23 '	210	15.0	270	10
10241100	20분	04° 31 '	106° 07 '	210	15.0	300	10
10241700	10분	03° 46 '	105° 44 '	210	15.0	300	10
10241800	20분	03° 33 '	105° 34 '	210	15.0	300	10
10242000	10분	03° 06 '	105° 20 '	210	16.0	315	10
10242200	20분	02° 40 '	105° 16 '	195	16.0	315	10
10281300	10분	01° 16 '	104° 41 '	080	13.0	045	5
10281500	20분	01° 27 '	104° 32 '	050	13.0	045	5
10282000	10분	01° 54 '	105° 40 '	085	14.0	090	5
10282300	20분	02° 13 '	106° 23 '	070	15.0	315	5
10290000	10분	02° 15 '	106° 32 '	070	15.0	315	5
10290200	20분	02° 25 '	107° 00 '	045	14.0	315	5
10291100	10분	03° 13 '	108° 36 '	050	14.0	220	5
10291300	10분	03° 43 '	109° 08 '	050	14.0	220	5
10291500	20분	04° 01 '	109° 32 '	050	15.0	220	5
10292000	10분	04° 48 '	110° 30 '	050	15.0	045	5
10300000	10분	05° 25 '	111° 16 '	050	15.0	220	5
10300200	20분	05° 43 '	111° 38 '	050	15.0	180	5
10301400	10분	06° 47 '	114° 19 '	070	15.0	220	5
10302000	10분	07° 17 '	115° 48 '	070	15.0	220	5
10310000	10분	07° 16 '	115° 45 '	090	15.0	220	5
10310300	20분	07° 15 '	115° 42 '	070	15.0	220	5
10311500	10분	08° 19 '	118° 20 '	085	15.0	220	5
11010000	20분	08° 27 '	119° 21 '	085	15.0	270	5
11010400	10분	08° 36 '	120° 19 '	085	15.0	270	5
11010700	20분	08° 40 '	120° 54 '	260	15.0	045	5
11010800	10분	08° 39 '	120° 46 '	260	15.0	045	5

저장파일명	저장 시간	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진풍향 (Deg.)	진풍속 (Kts)
11010900	20분	08° 37 '	120° 32 '	260	15.0	045	5
11011600	10분	08° 43 '	121° 13 '	260	13.0	330	5
11061700	20분	08° 43 '	121° 14 '	080	13.0	330	5
11012000	10분	08° 49 '	121° 56 '	080	14.0	330	5
11052200	20분	12° 30'	124° 07'	040	13.0	020	20
11060400	10분	13° 38'	124° 33'	000	12.0	020	20
11061200	20분	15° 04'	124° 43'	015	12.0	045	25
11061300	10분	15° 14'	124° 46'	115	12.0	045	25
11062000	10분	16° 39'	124° 57'	010	12.0	045	20
11062200	20분	17° 08'	125° 00'	020	12.0	045	20
11070100	10분	17° 38'	125° 06'	015	13.0	045	20
11070200	20분	17° 56'	125° 11'	020	13.0	045	20
11071200	10분	19° 48'	125° 36'	005	12.0	045	25
11080400	20분	23° 24'	126° 31'	030	14.0	045	20
11081700	10분	26° 01'	127° 56'	025	13.0	000	30
11081800	20분	26° 11'	128° 04'	045	12.0	000	30
11090500	10분	26° 25'	128° 08'	045	0	000	25
11091600	20분	26° 58'	128° 23'	300	12.0	000	25
11100400	10분	29° 09'	128° 02'	350	13.0	000	15
11100500	20분	29° 25'	128° 00'	020	14.0	000	15
11101300	10분	31° 20'	127° 56'	350	14.0	220	10
11101500	20분	31° 54'	127° 49'	350	16.0	220	10

#### 4.1.3 실험 결과

선체 상하가속도 실선 실험의 주요 목적은 계측간격 및 계측시간이 상하가속도의 분산치에 미치는 영향을 조사하고, 가장 적합한 것을 선택하기 위함이다. 따라서 본 시험 결과에서는 파와의 만남각이 선수에서 선미에 이르는 저장 파일을 중심으로, 같은 해상 상태 조건에서 10분 및 20분 계측시간을 저장한 파



일을 대상으로 상하가속도의 분산치를 비교한다. 또한, 계측한 파일이 각각 80개에 달하지만, 상하가속도가 비교적 크게 발생하는 해상 상태가 큰 경우의 저장파일을 대상으로 하였다. 여기서, 파와의 만남각은 선수파를  $180^\circ$ 로 정하였다.

Fig. 4-3과 Fig. 4-4는 해상 상태 B.F. No. 6인 해상을 파와의 만남각이 선수파 ( $180^\circ$ )일 경우, 선속 12 Kts로 항해 중일 때 각각 계측시간이 10분과 20분인 상하가속도의 계측 데이터를 시계열로 표시한 그림이다. 상하가속도의 분산치는 10분의 계측시간에는 0.00934로, 20분의 계측시간에는 0.0107로 상당히 큰 수치를 나타내고 있지만, 계측시간이 상하가속도의 분산치에 미치는 영향은 거의 없는 결과를 얻었다.

Fig. 4-5와 Fig. 4-6은 해상 상태 B.F. No. 4인 해상을 파와의 만남각이  $150^\circ$ 일 경우, 선속 14 Kts로 항해 중일 때 각각 계측시간이 10분과 20분인 상하가속도의 계측 데이터를 시계열로 표시한 그림이다. 상하가속도의 분산치는 10분의 계측 시간에는 0.0004로, 20분의 계측시간에는 0.00042로 계산되어 상하가속도의 분산치는 거의 같은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 4-7과 Fig. 4-8은 파와의 만남각이  $150^\circ$ 일 경우이지만, 해상 상태가 B.F. No. 7인 조건으로, 이 상태에서 상하가속도의 분산치는 10분의 계측시간에는 0.00104로, 20분의 계측시간에는 0.0087로 상당히 큰 수치를 얻었지만, 계측 시간이 상하가속도의 분산치에 미치는 영향은 거의 없는 결과를 얻었다.

Fig. 4-9와 Fig. 4-10은 해상 상태 B.F. No. 5인 해상을 파와의 만남각이 거의 횡파 ( $110^\circ$ )일 경우, 선속 15 Kts로 항해 중일 때 각각 계측시간이 10분과 20분인 상하가속도의 계측 데이터를 시계열로 표시한 그림이다. 상하가속도의 분산치는 10분의 계측시간에는 0.00056로, 20분의 계측시간에는 0.00049로 계측

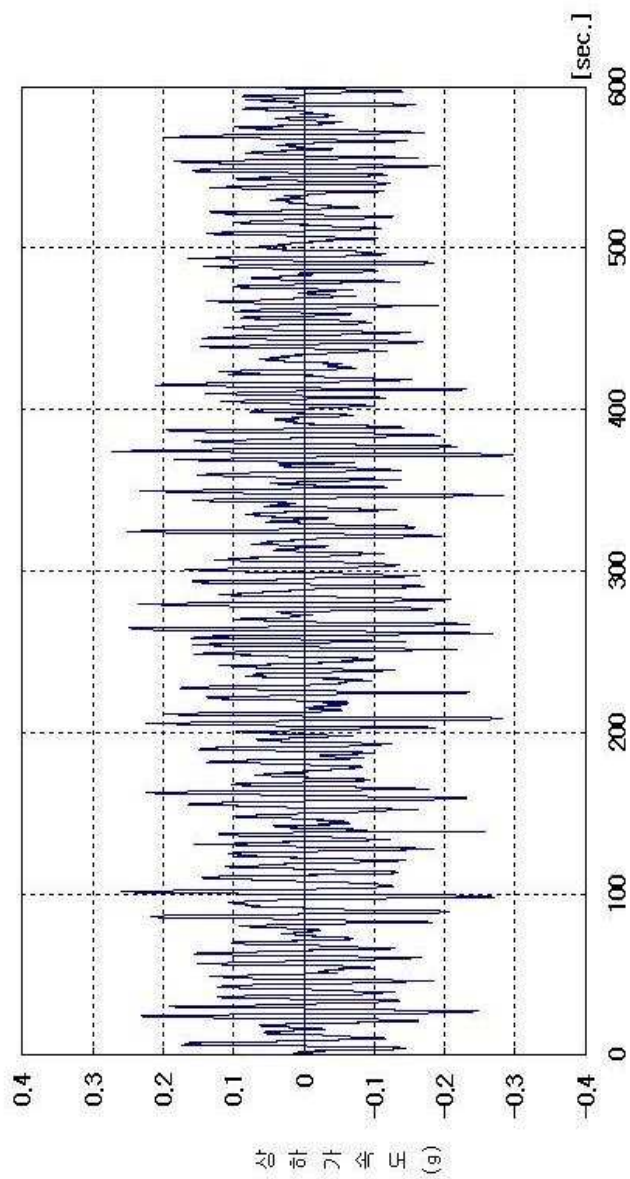
시간이 상하가속도의 분산치에 미치는 영향은 거의 없는 결과를 얻었다.

Fig. 4-11과 Fig. 4-12는 해상 상태 B.F. No. 5인 해상을 파와의 만남각이  $060^\circ$ 일 경우, 선속 12 Kts로 항해 중일 때 각각 계측시간이 10분과 20분인 상하가속도의 계측 데이터를 시계열로 표시한 그림이다. 상하가속도의 분산치는 10분의 계측 시간에는 0.00038로, 20분의 계측 시간에는 0.00032로 계측 시간이 상하가속도의 분산치에 미치는 영향은 거의 없는 결과를 얻었다.

Fig. 4-13과 Fig. 4-14는 해상 상태 B.F. No. 5인 해상을 파와의 만남각이 선미 추파 ( $030^\circ$ )일 경우, 선속 15 Kts로 항해 중일 때 각각 계측시간이 10분과 20분인 상하가속도의 계측 데이터를 시계열로 표시한 그림이다. 상하가속도의 분산치는 10분의 계측시간에는 0.00027로, 20분의 계측시간에는 0.00031로 계측 시간이 상하가속도의 분산치에 미치는 영향은 거의 없는 결과를 얻었다. 또한, 같은 해상 상태에서도 선수파일 경우보다 횡파나 선미 추파일 경우에 상하가속도의 분산치는 상당히 감소하는 경향을 알 수 있었다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 파와의 만남각 및 해상 상태가 계측시간에 따른 상하가속도의 분산치에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 조사되었다. 따라서 상하가속도의 분산치를 구하는 데 있어서 계측 시간을 10분으로 설정하여도 표본 분포로서 충분히 사용할 수 있는 것을 알 수 있다. 또한, 각 해상 상태에 있어서 상하가속도의 주기는 파와의 만남각에 따라 다소간의 차이가 있지만, 작은 것은 2~3초, 긴 것은 5~6초로 나타났으며, 이와 같은 주기에서 계측 간격을 100ms로 정하면 한 주기 당 데이터의 샘플 수는 20~60개로 되어, 계측 데이터를 A/D 변환하여도 원 파형의 데이터를 충분히 나타낼 수 있을 것으로 생각된다.

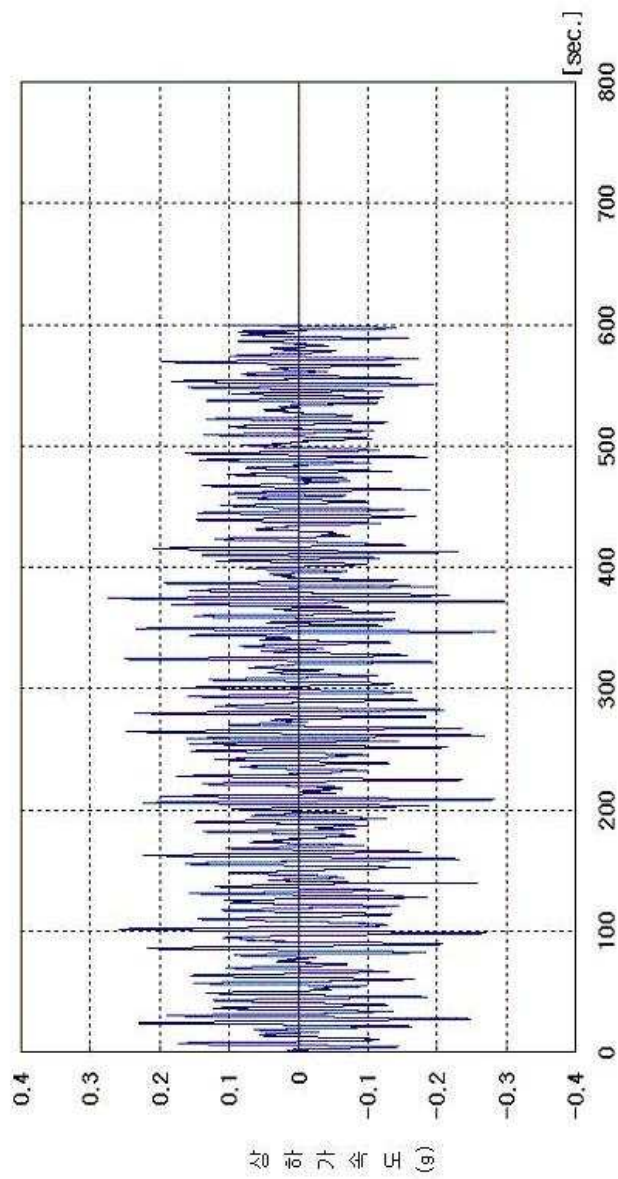
[File:11061300, 선속 12 kts, B.F. No.6, 만남각 180°, 저장시간 10분]



[상하가속도 분산치 : 0.00934]

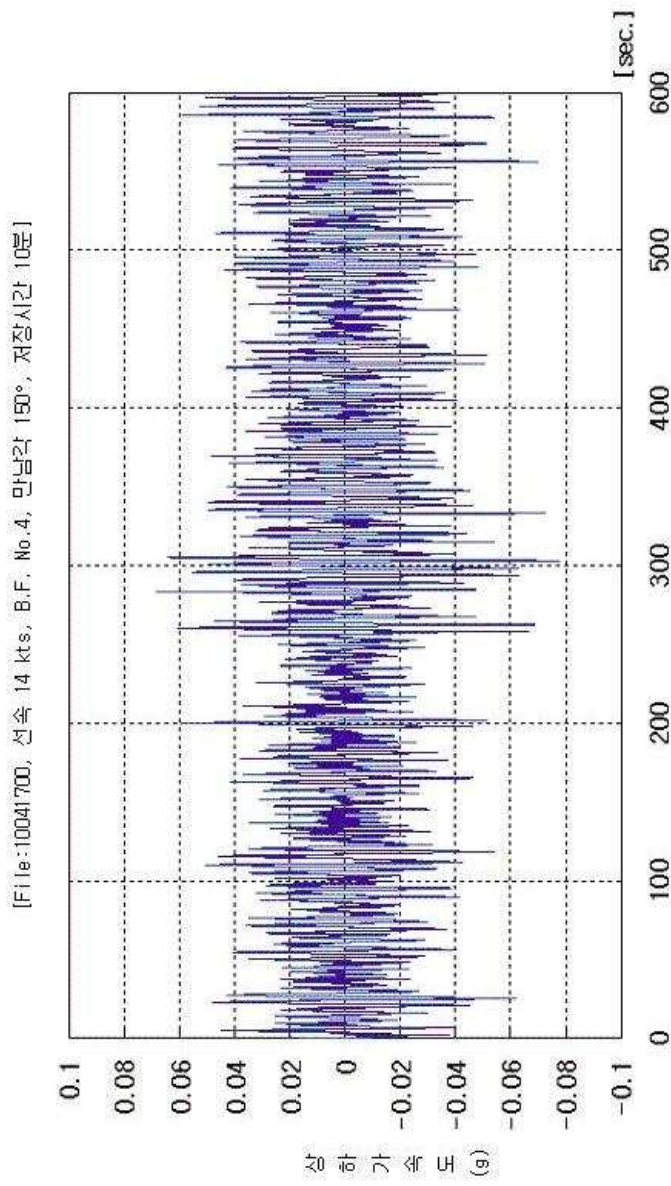
Fig. 4-3 Time series data of vertical acceleration

[File:11061200, 선속 12 kts, B.F. No.6, 만남각 180°, 저장시간 20분]



[상하가속도 분산치 : 0.0107]

Fig. 4-4 Time series data of vertical acceleration



[상하가속도 분산치 : 0.0004]

Fig 4-5 Time series data of vertical acceleration

[File:10041800, 선속 14 kts, B.F. No.4, 만남각 150°, 저장시간 20분]

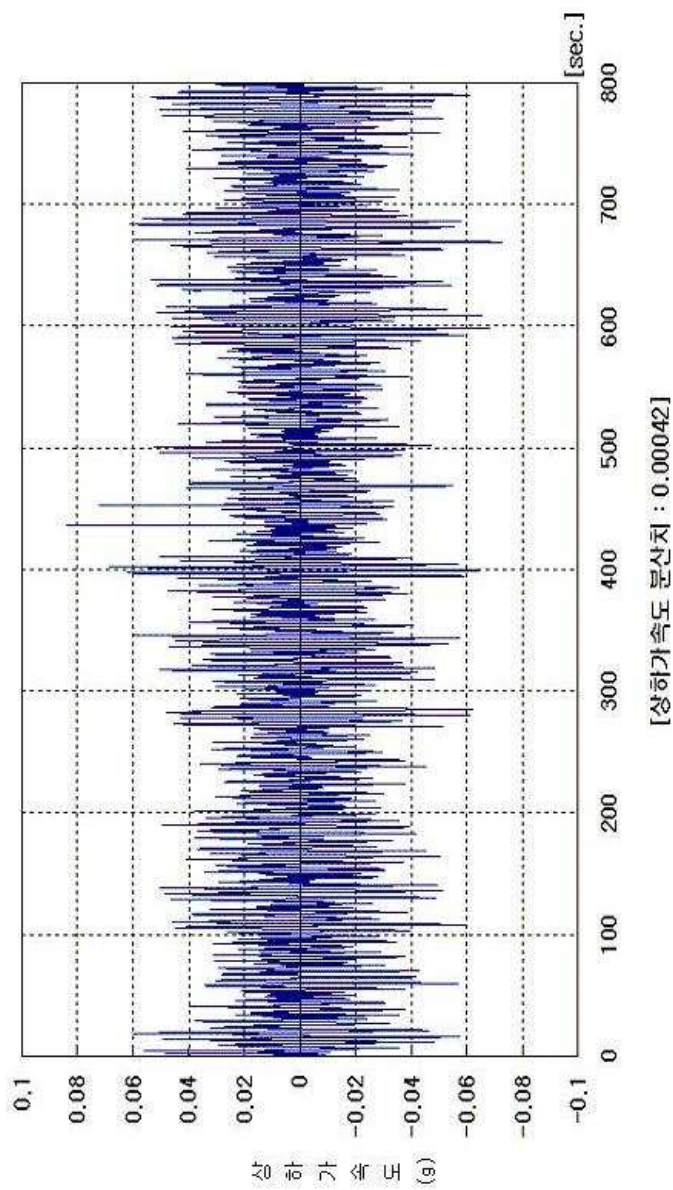


Fig 4-6 Time series data of vertical acceleration

[File:11081700, 선속 13 kts, B.F. No.7, 만남각 150°, 저장시간 10분]

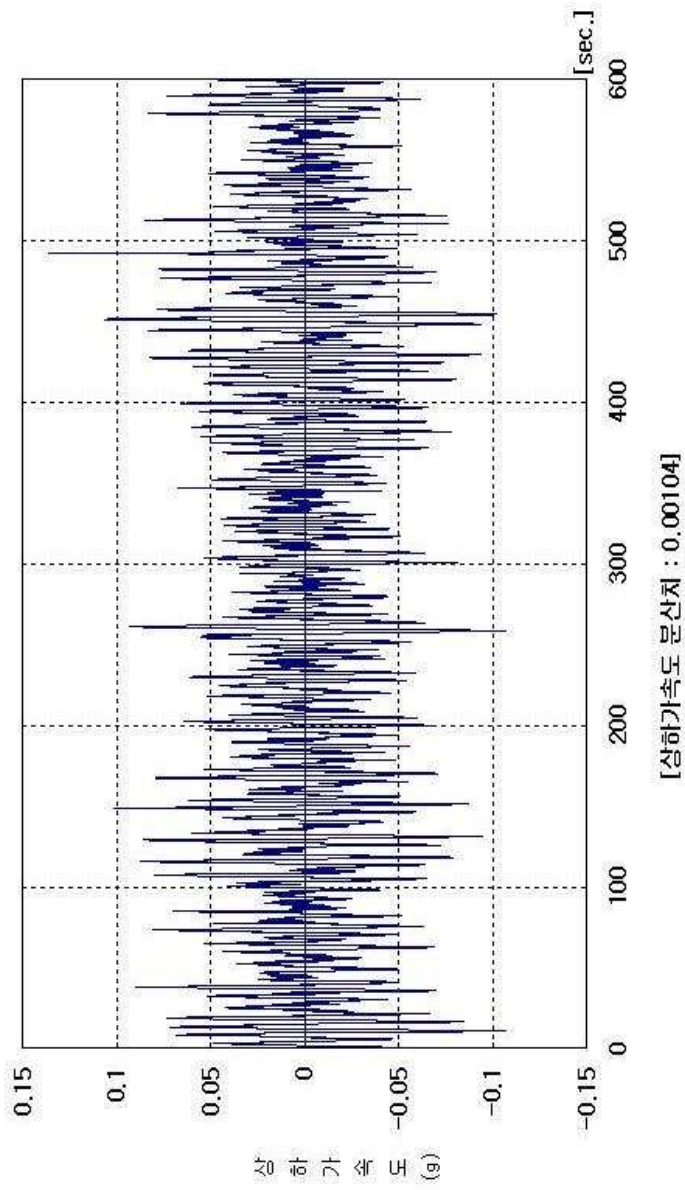


Fig 4-7 Time series data of vertical acceleration



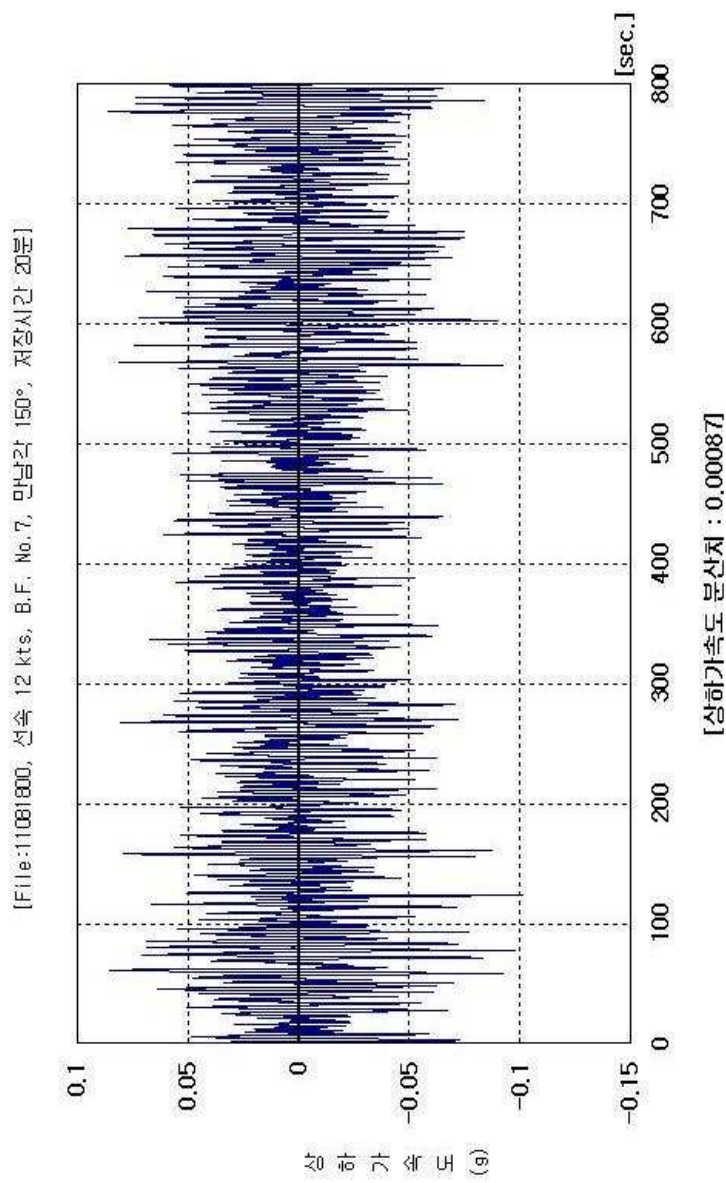
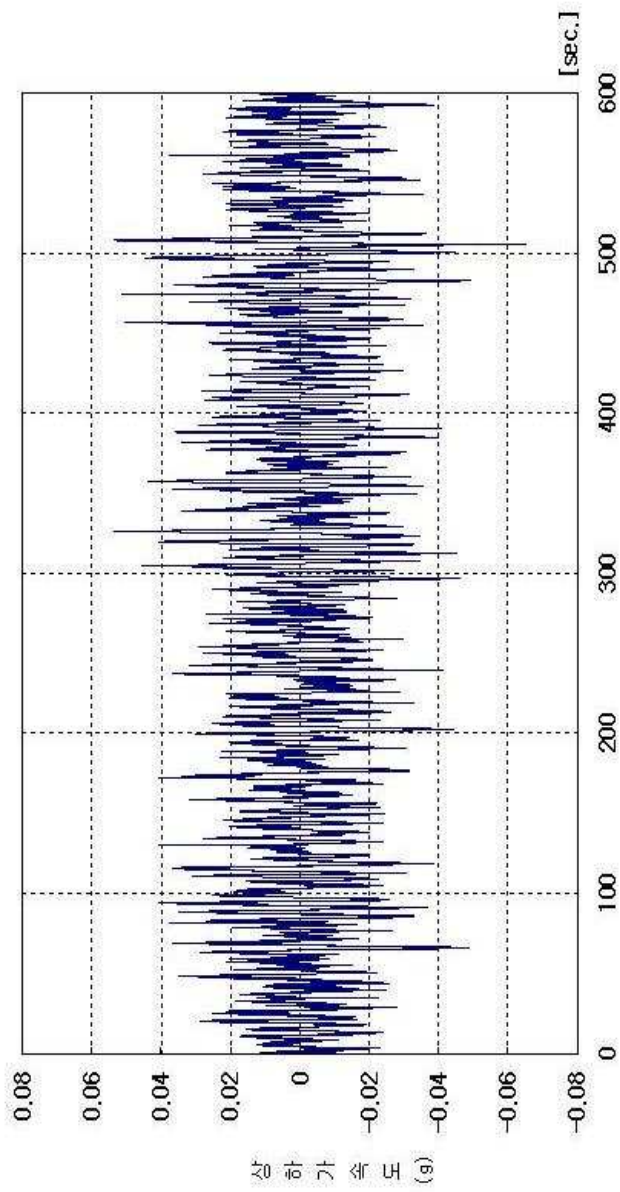


Fig. 4-8 Time series data of vertical acceleration



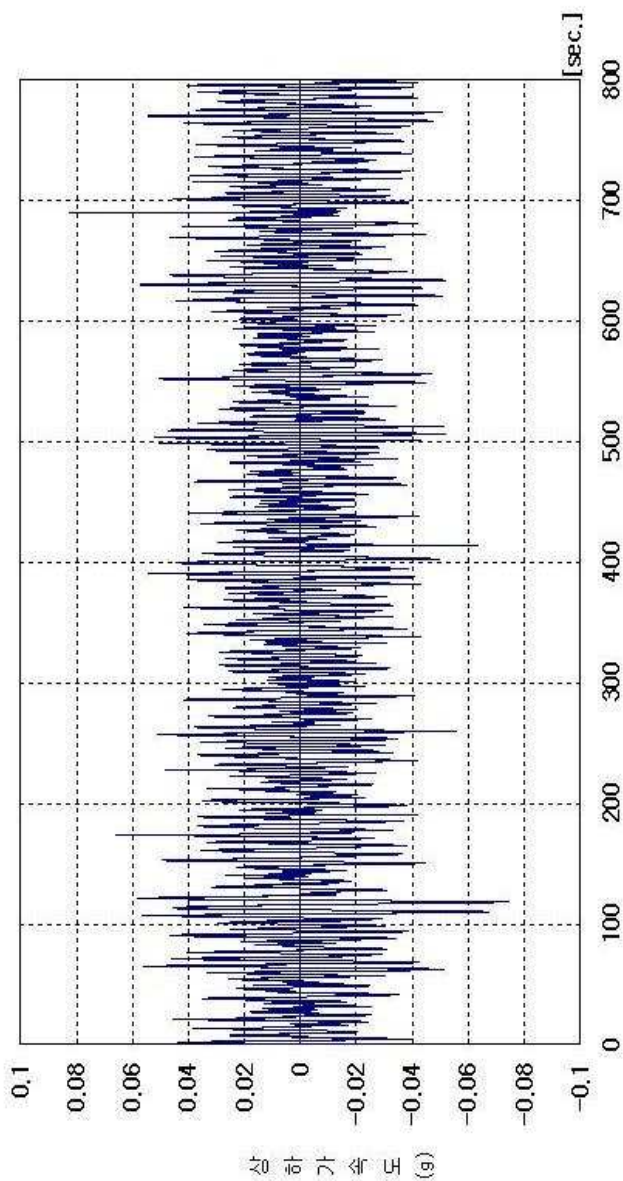
[File:10101600, 선속 15 kts, B.F. No.5, 만남각 110°, 저장시간 10분]



[상하가속도 분산치 : 0.00056]

Fig. 4-9 Time series data of vertical acceleration

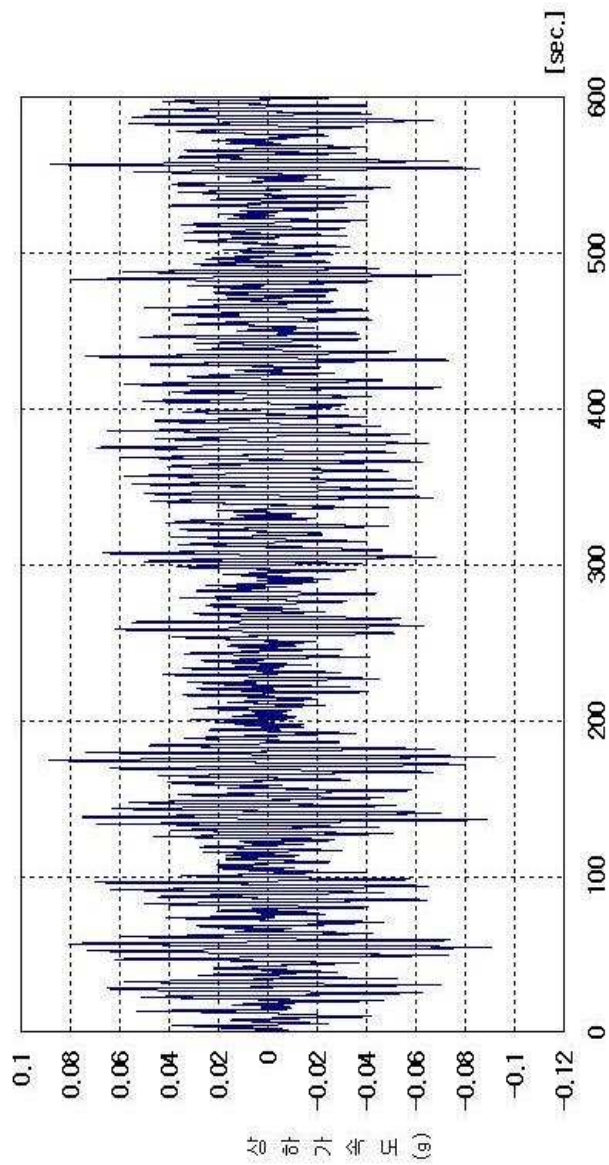
[File:10101800, 선속 15 kts, B.F. No.5, 만남각 110°, 저장시간 20분]



[상하가속도 분산치 : 0.00049]

Fig. 4-10 Time series data of vertical acceleration

[File:10110000, 선속 12 kts, B.F. No.5, 만남각 060°, 저장시간 10분]



[상하가속도 문산치 : 0.00038]

Fig. 4-11 Time series data of vertical acceleration

[File:10110200, 선속 12 kts, B.F. No.5, 만남각 060°, 저장시간 20분]

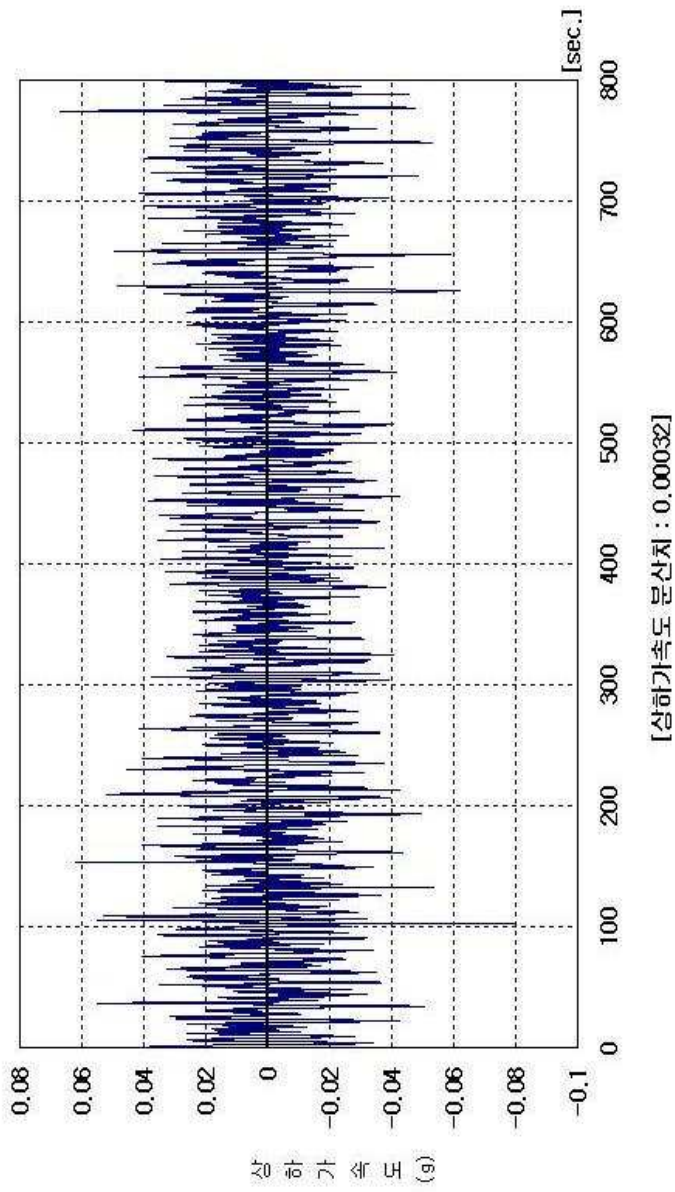
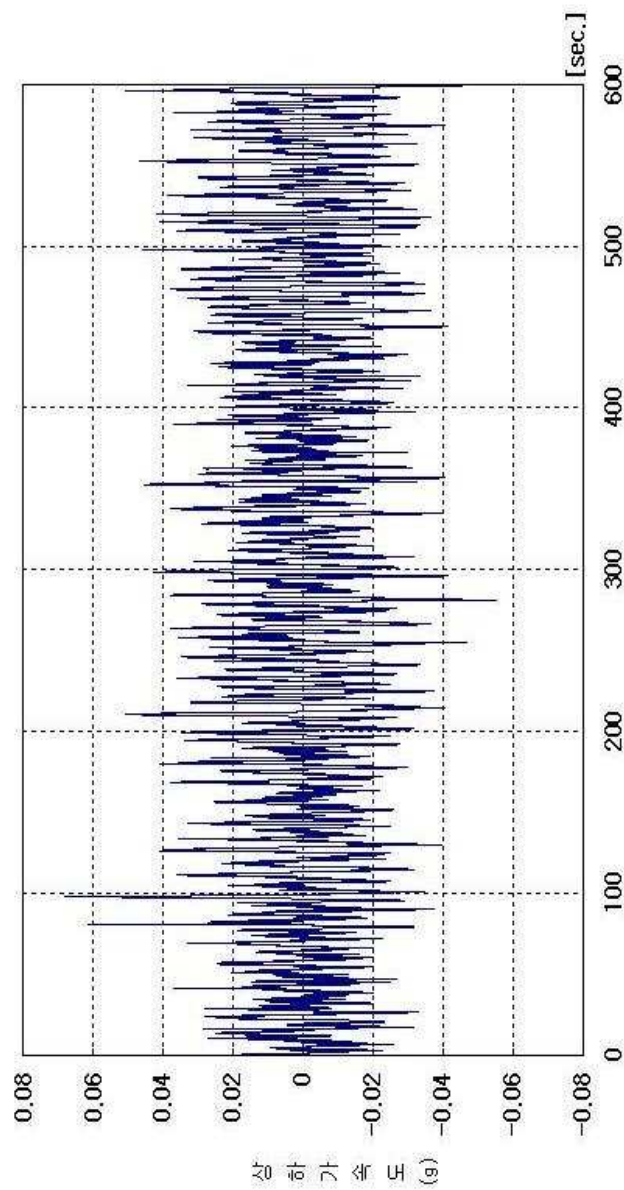


Fig. 4-12 Time series data of vertical acceleration

[File:10110800, 선속 15 kts, B.F. No.5, 만남각 030°, 저장시간 10분]

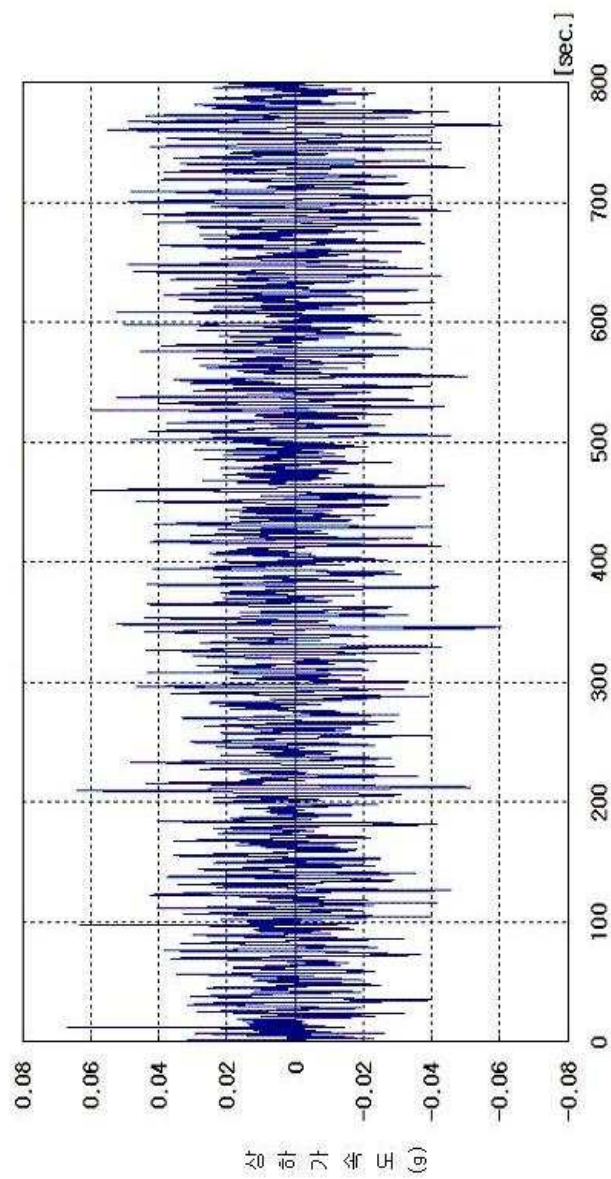


[상하가속도 분산치 : 0.00027]

Fig. 4-13 Time series data of vertical acceleration



[File:10111000, 선속 15 kts, B.F. No.5, 만남각 030°, 저장시간 20분]



[상하가속도 분산치 : 0.00031]

Fig. 4-14 Time series data of vertical acceleration

## 4.2 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템 실선 실험

### 4.2.1 실험 개요

본 실험의 대상선박은 4.1과 동일한 여객선형인 한국해양대학교 실습선 한나라호이며, 2003년 3월 연안항해 기간 중, 항해안전성 평가시스템을 탑재하여 실선 실험을 실시하였다. 실선 실험에 사용한 한나라호의 주요 목은 Table 4-2에 나타내었으며, 적재 상태는 Half loaded condition이었다. 자세한 연안항해 일정을 Table 4-5에 나타낸다. 주로 항해한 항로는 남해안, 제주도 부근 해상이었다.

Table 4-5 Coastal navigation schedule of T/S 'HANARA'

항구명	입항일시	거 리 (Mile)	항해일수
	출항일시		
부산	2003. 03. 17 10:00	1002	2d-22h
	2003. 03. 20 08:00		
부산			

본 실선 실험에서는 항해안전성 평가시스템을 2개 사용하였다. 내항성능지표 계산 및 항해안전성 평가 화상처리에 컴퓨터 및 알고리즘은 동일하지만, 상가속도 계측장치를 한 세트 더 제작하여 실선 실험에 사용하였다. 여기에서는

4.1에서 사용된 가속도 센서(Ⅰ)를 부착한 상하가속도 계측장치를 항해안전성 평가시스템(Ⅰ)로 하고, Table 4-6에 각종 사양을 나타낸 3축 가속도 센서(Ⅱ)를 부착한 상하가속도 계측장치를 항해안전성 평가시스템(Ⅱ)로 한다.

항해안전성 평가시스템(Ⅱ)의 상하가속도 계측장치의 특징으로 이 증폭기에는 저대역 필터 기능이 포함되어 있어 선체 진동이 상하가속도에 미치는 영향을 조사할 수 있다. 또한, 16 채널의 A/D Converter를 사용하였다. Table 4-6에 항해안전성 평가시스템(Ⅱ)에 사용된 가속도 센서(Ⅱ)의 주요 사양을 표시한다.

Table 4-6 Principal Specifications of the Accelerometer(Ⅱ)

ITEMS	DIMENSION
Rated Capacity	$\pm 2 \text{ g}$
Rated output	$0.5 \text{ mV/V} (1000 \times 10^{-6} \text{ strain}) \text{ min.}$
Non-linearity	$\pm 1\% \text{ RO}$
Hysteresis	$\pm 1\% \text{ RO}$
Input resistance	$121\Omega \pm 1.7\%$
Output resistance	$121\Omega \pm 1.7\%$
Recommended applied voltage	1 to 3V AC or DC
Allowable applied voltage	6V AC or DC
Transverse sensitivity	$\pm 4\%$
Allowable temperature range	$-10^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$
Damping ratio	0.64
Dimension	$44 \times 44 \times 20 \text{ (mm)}$
Mass	110 (g)



#### 4.2.2 계측 방법

계측은 2등항해사 당직시간 중 항로와 해상 상태를 적절하게 고려한 시간을 선정하여 실시하였다.

항해안전성 평가시스템의 설치장소는 대상선박인 한나라호의 선교이며, 2세트의 선체 상하가속도 계측장치는 거의 같은 장소로서 선수방향은 선체중심선 상에, 좌우방향은 선체중심선과 수직이 되도록 설치하였다. 또한, 선체의 심한 운동으로 인해 실험장치의 동요가 생기지 않도록 고정을 하였다.

또한, 4.1의 실선 실험 결과를 바탕으로 상하가속도 데이터의 계측시간은 10분으로, 계측 간격은 100ms로 설정하였다. 항해안전성 평가시스템의 실선 시험시 참고로 기록한 항목은 선박위치, 침로, 선속, 진풍향, 진풍속, 상하가속도 등이 있으며, 이를 정리하여 각 평가시스템 별로 Table 4-7과 Table 4-8에 나타낸다.

Table 4-7 Principal articles at onboard test of evaluation system of navigation safety( I )

저장 파일명	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진풍향 (Deg.)	진풍속 (Kts)	상하 가속도 분산치	비고
03190245	33° 10 '	126° 35 '	090	15.5	270	10	0.00026	
03190255	33° 10 '	126° 39 '	090	15.5	270	10	0.00024	
03190315	33° 10 '	126° 45 '	055	15.3	350	25	0.00024	
03191225	33° 44 '	125° 55 '	074	13.9	340	15	0.00030	
03191240	33° 45 '	125° 59 '	074	14.0	340	15	0.00033	
03191315	33° 48 '	126° 09 '	074	14.2	320	15	0.00020	
03191330	33° 49 '	126° 12 '	074	14.2	310	15	0.00019	
03191340	33° 50 '	126° 15 '	100	13.8	310	15	0.00013	
03191350	33° 50 '	126° 18 '	100	14.0	310	15	0.00015	

Table 4-8 Principal articles at onboard test of evaluation system of navigation safety(Ⅱ)

저장 파일명	위도 (N)	경도 (E)	침로 (Deg.)	선속 (Kts)	진풍향 (Deg.)	진풍속 (Kts)	상하 가속도 분산치	비고
03181205	33° 30 '	126° 05 '	130	13.5	360	20	0.00268	
03181215	33° 27 '	126° 09 '	130	14.0	360	20	0.00212	
03181235	33° 26 '	126° 09 '	215	13.5	360	20	0.00152	
03181255	33° 21 '	126° 04 '	215	13.5	360	20	0.00178	
03181315	33° 18 '	126° 03 '	160	13.5	360	20	0.00136	
03181330	33° 15 '	126° 05 '	160	14.0	360	20	0.00147	
03181345	33° 12 '	126° 06 '	160	14.2	360	20	0.00139	
03181405	33° 08 '	126° 09 '	130	14.5	340	23	0.00172	
03181430	33° 05 '	126° 12 '	180	7.5	340	20	0.00086	
03181440	33° 03 '	126° 12 '	050	10.0	340	20	0.00190	
03181520	33° 01 '	126° 16 '	050	14.0	330	27	0.00661	
03181530	33° 03 '	126° 18 '	050	14.7	330	25	0.00350	
03181545	33° 04 '	126° 21 '	050	14.8	330	25	0.00360	
03190010	33° 08 '	126° 08 '	140	14.0	350	22	0.00175	
03190020	33° 05 '	126° 10 '	140	13.5	350	24	0.00036	Filtering
03190035	33° 03 '	126° 12 '	140	13.8	350	27	0.00225	
03190045	33° 01 '	126° 14 '	140	14.0	350	27	0.00039	Filtering
03190110	33° 00 '	126° 18 '	045	13.8	330	31	0.00097	Filtering
03190150	33° 06 '	126° 22 '	000	13.6	330	32	0.00041	Filtering
03190205	33° 10 '	126° 24 '	090	15.0	340	15	0.00018	Filtering
03190220	33° 10 '	126° 28 '	090	15.2	270	8	0.00231	
03190230	33° 10 '	126° 31 '	090	15.2	270	8	0.00019	Filtering
03190330	33° 12 '	126° 48 '	055	15.3	340	25	0.00019	Filtering
03191210	33° 44 '	125° 52 '	074	13.0	340	15	0.00010	Filtering
03191250	33° 46 '	126° 02 '	074	13.9	340	15	0.00007	Filtering
03191305	33° 48 '	126° 06 '	074	13.9	340	15	0.00006	Filtering
03191405	33° 49 '	126° 22 '	090	14.3	320	12	0.00004	Filtering
03191415	33° 49 '	126° 25 '	090	14.5	320	12	0.00004	Filtering
03191430	33° 49 '	126° 29 '	090	14.8	330	12	0.00004	Filtering

### 4.2.3 실험 결과

항해안전성 평가시스템 실선 실험의 주요 목적은 본 연구에서 개발한 선체 상하가속도 계측장치와 Visual C++로 작성한 내항성능지표 계산 프로그램 및 항해안전성 평가 화상처리 프로그램의 정확한 작동 상태를 점검하기 위함이고, 부가적으로 선체 상하가속도 계측장치를 한 세트 더 제작하여 선체 진동이 상하가속도 발생에 미치는 영향을 조사하기 위함이다.

따라서 본 실선 실험에서는 Table 4-7과 Table 4-8에 나타낸 바와 같이 항해안전성 평가시스템(I)로 9개의 데이터 파일을 구하였고, 항해안전성 평가시스템(II)로는 29개의 데이터 파일을 구하였으며, 이 중에서 13개의 데이터 파일은 상하가속도를 계측하는 데 있어서 저대역 필터를 사용하여 선체 진동 성분의 영향을 조사하였다.

Fig. 4-15에서 Fig. 4-23까지는 항해안전성 평가시스템(I)로 계측한 상하가속도의 시계열 데이터를 나타낸다. 상하가속도의 분산치는 해상 상태가 양호하고, 또한 연안항해의 특성상 전반적으로 작은 값으로 계산되었다.

Fig. 4-24에서 Fig. 4-39까지는 항해안전성 평가시스템(II)로 계측한 상하가속도의 시계열 데이터를 나타낸다. 이 중에서 Fig. 4-24, Fig. 4-26 및 Fig. 4-31은 저대역 필터를 사용하지 않은 상하가속도의 계측 데이터이며, 나머지는 저대역 필터를 사용하여 계측한 데이터의 시계열을 표시한다.

Fig. 4-24에서 Fig. 5-27까지는 해상 상태, 선속 및 침로가 거의 같은 조건일 경우이지만, 저대역 필터를 사용하지 않은 상하가속도 (Fig. 4-24, Fig. 4-26)와 사용한 상하가속도 (Fig. 4-25, Fig. 4-27)의 분산치는 현격한 차이가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 같은 해상조건에서 항해안전성 평가시스템(I)로

계측한 상하가속도의 분산치는 저대역 필터를 사용한 상하가속도의 분산치와 거의 같은 값으로 되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 항해안전성 평가시스템(Ⅱ)로서 저대역 필터를 사용하지 않고 계측한 상하가속도의 분산치가 현격하게 높은 값을 가지는 원인을 분석하면, 항해안전성 평가시스템(Ⅰ)의 상하가속도 계측장치에서 상하가속도 센서는 계측장치의 박스 아래 부분의 지지대에 확실하게 고정되어 있어 선체 진동에 의한 영향을 거의 받지 않지만, 항해안전성 평가시스템(Ⅱ)의 상하가속도 계측장치에서 상하가속도 센서는 계측장치의 박스 아래 부분의 지지대에서 약 10cm 윗부분에 쇠막대 파이프 4개로 고정되어 있어 선체 진동의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판명되었다.

Fig. 4-40은 해상 상태 B.F. No. 6, 파와의 만남각은 선미추사파, 선속은 14 Kts에서 계측한 상하가속도의 시계열 데이터를 50초에서 100초 사이의 계측점을 기준으로 표시한 것이며, Fig. 4-41은 같은 해상 상태와 조건에서 약 10분 뒤에 계측한 시계열 데이터를 나타낸 그림이다.

Fig. 4-40에서는 저대역 필터를 사용하지 않은 것으로서 상하가속도가 선체 진동성분에 의한 영향을 많이 받고 있는 것을 알 수 있으며, 따라서 상하가속도의 주기도 0.05초로서 부적절하게 계측되어지고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 4-41은 저대역 필터를 사용한 것으로서, 이 경우 상하가속도의 주기는 약 5초 정도로 되어 있으며, 선체 진동에 의한 영향이 현저하게 감소되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 고려하면, 상하가속도 센서를 고정하는 데 있어서 선체 진동의 영향을 받지 않도록 지지대의 설계에 많은 고려를 해야 할 필요가 있다고 생각된다.

Fig. 4-42과 Fig. 4-43은 선박 항해안전성 경과도를 바탕으로 내항성능지표를 도시한 것으로서, 각각 항해안전성중 평가시스템(Ⅰ)과 시스템(Ⅱ)의 계산 결과를 나타내고 있다. Fig. 4-42에서 보는 바와 같이 항해안전성 평가시스템

(I)을 사용하여 구한 종합내향성능지표는 전 계측 구간에 걸쳐서 약 0.05로 계산되어, 선박 전체의 항해안전성은 매우 안전한 것으로 나타났다.

한편 Fig. 4-43에서 보는 바와 같이 항해안전성 평가시스템(II)를 사용하여 구한 종합내향성능지표는 저대역 필터를 사용하지 않은 구간에서는 최대치가 약 0.5 정도로 계산되었지만, 저대역 필터를 사용한 구간에서는 항해안전성 평가시스템(I)을 사용하여 구한 종합내향성능지표와 마찬가지로 0.05 정도로 계산되었다.

[File:03190245, 선속 15.5 kts, B.F. No.3, 만남각 000°, 저장시간 10분]

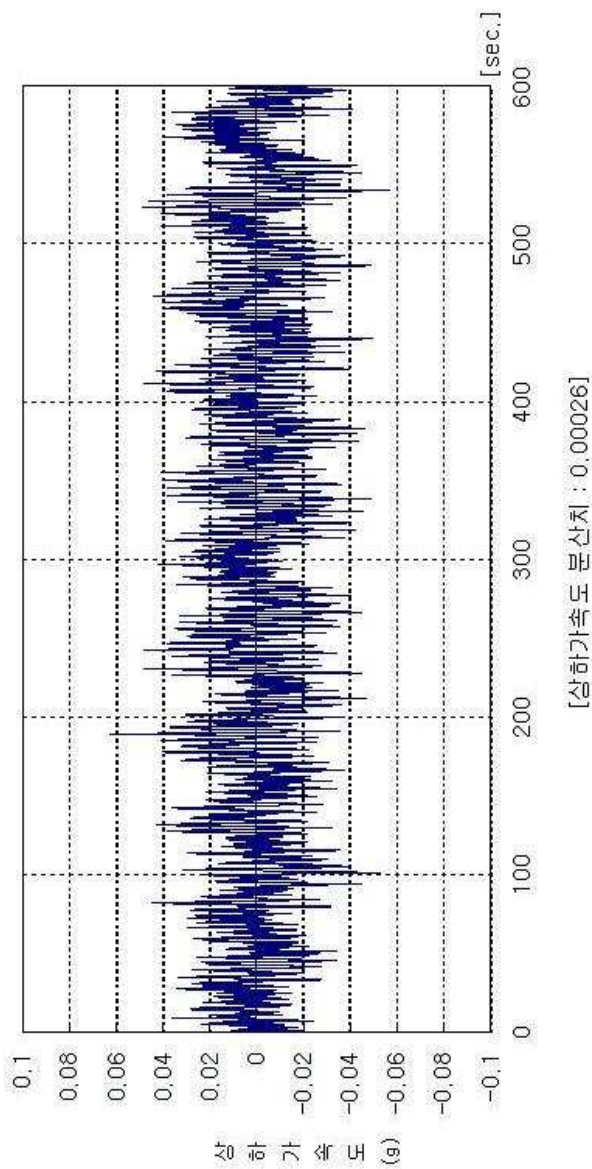


Fig. 4-15 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(1)]

[File:03190255, 선속 15.5 kts, B.F. No.3, 만남각 000°, 저장시간 10분]

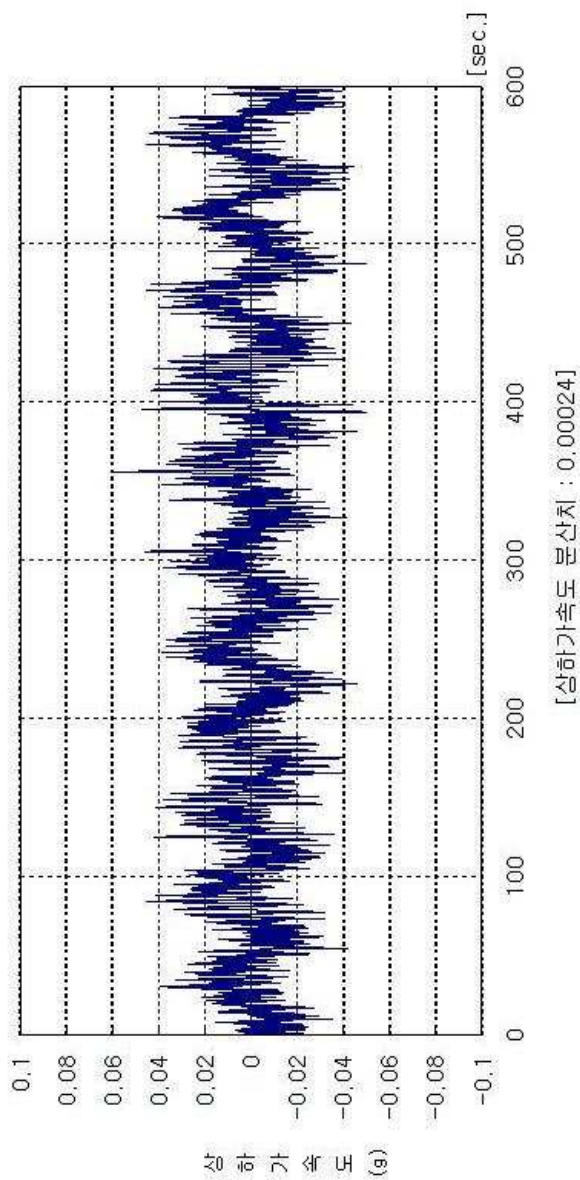


Fig. 4-16 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )]

[File:03190315, 선속 15.3 kts, B.F. No.6, 만남각 115°, 저장시간 10분]

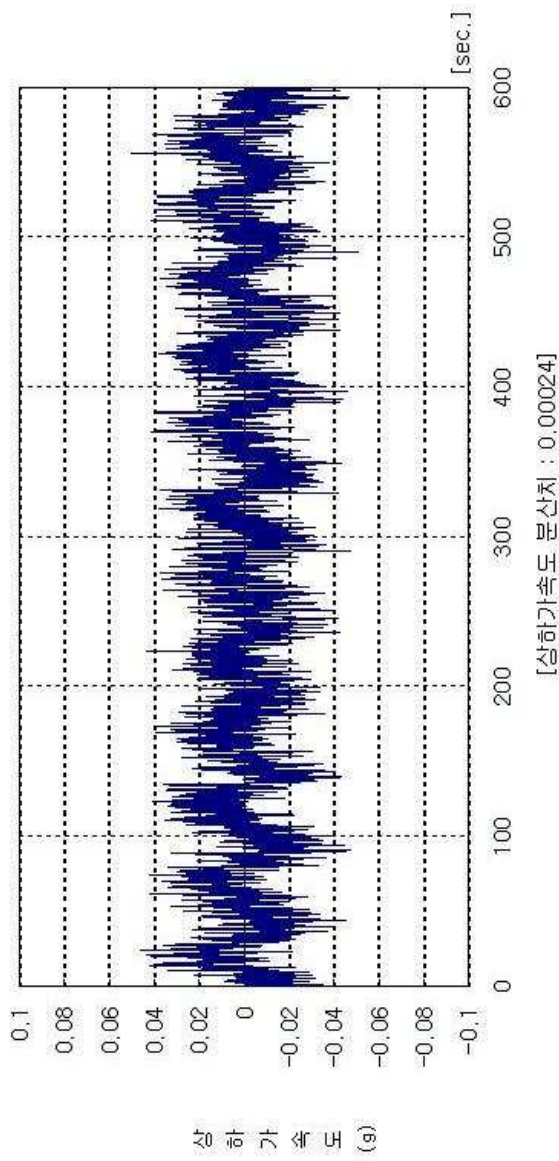


Fig. 4-17 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(1)]



[File:03191225, 선속 13.9 kts, B.F. No.4, 만남각 085°, 저장시간 10분]

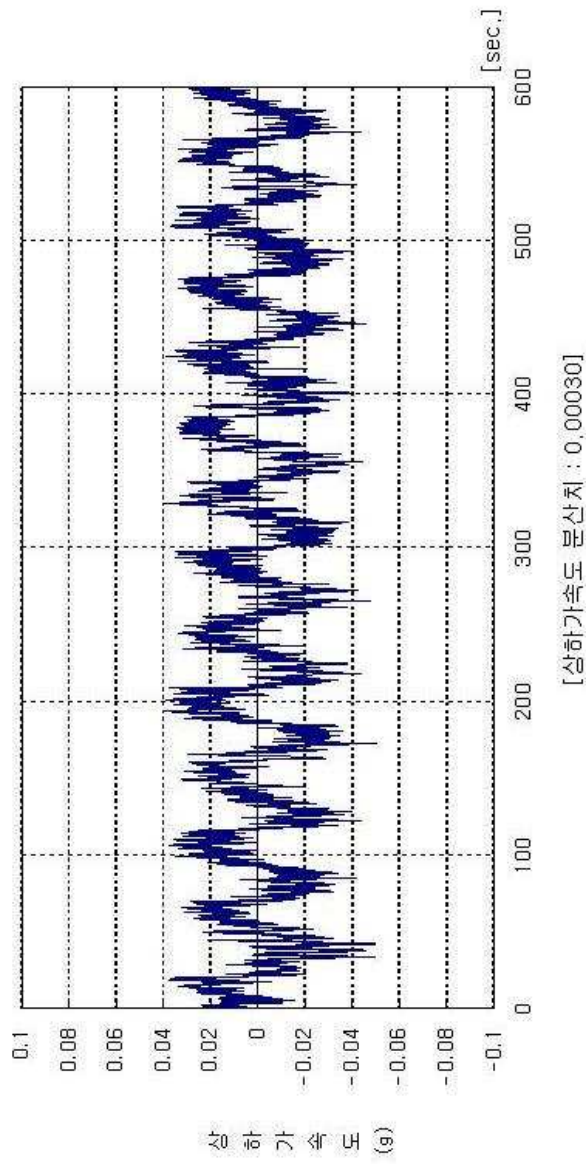


Fig. 4-18 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(1)]

[File:03191240, 선속 14 kts, B.F. No.4, 만남각 088°, 저장시간 10분]

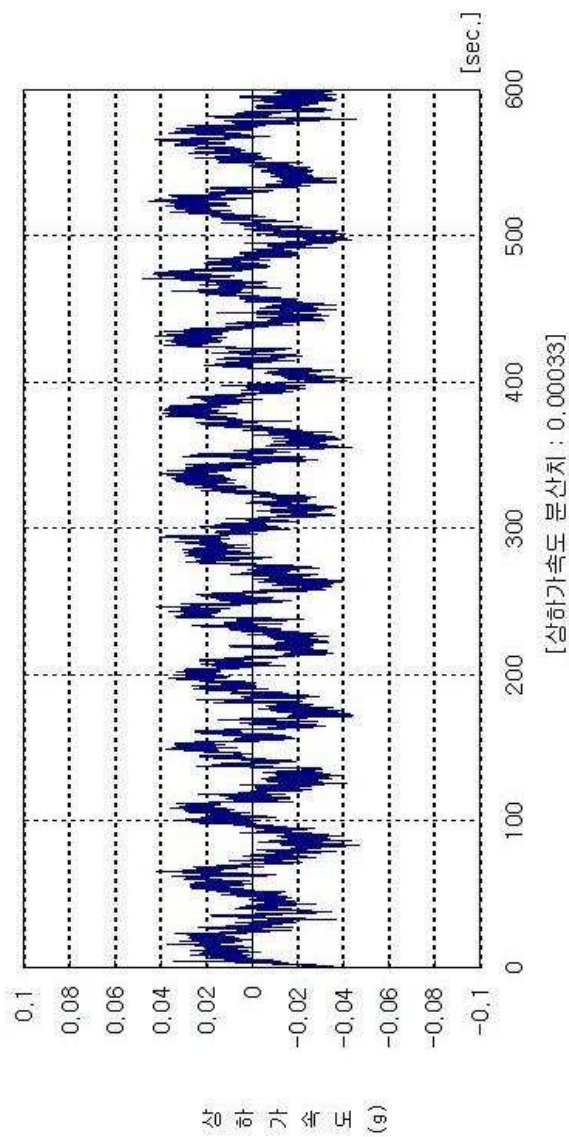


Fig. 4-19 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( )]

[File: 03191315, 선속 14.2 kts, B.F. No. 4, 만남각 065°, 저장시간 10분]

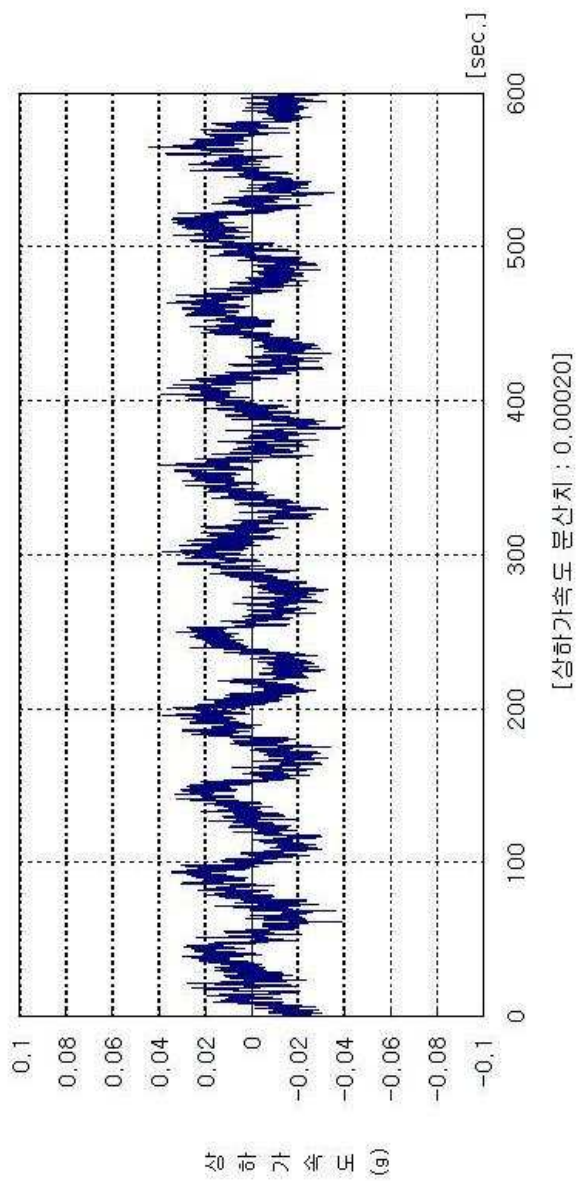


Fig. 4-20 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( 1 )]

[File:03191330, 선속 14.2 kts, B.F. No.4, 만남각 065°, 저장시간 10분]

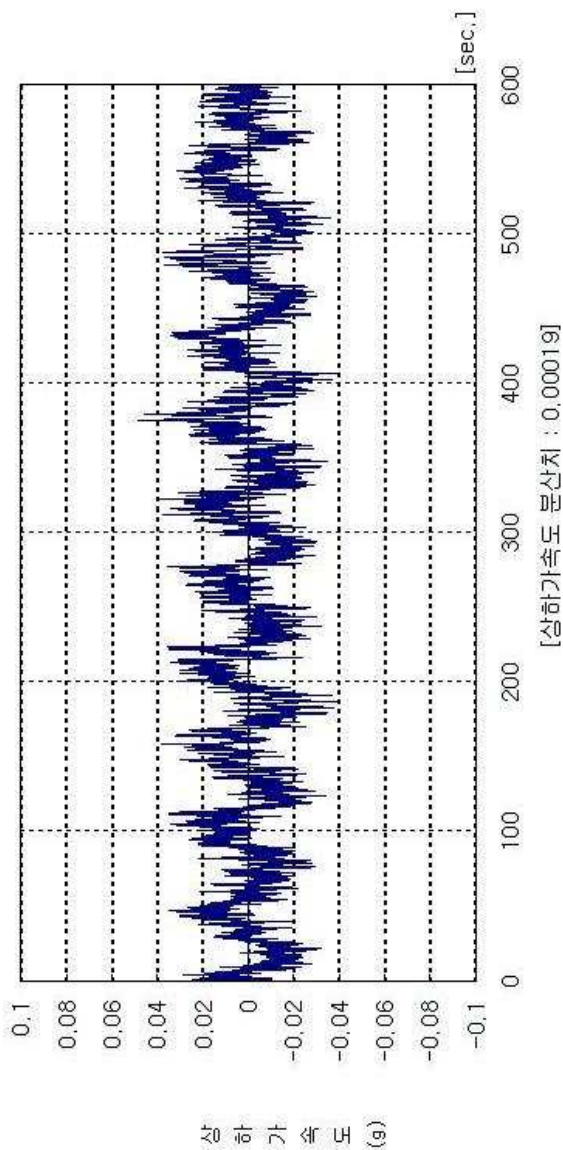


Fig. 4-21 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(1)]

[File:03191340, 선속 13.8 kts, B.F. No.4, 만남각 055°, 저장시간 10분]

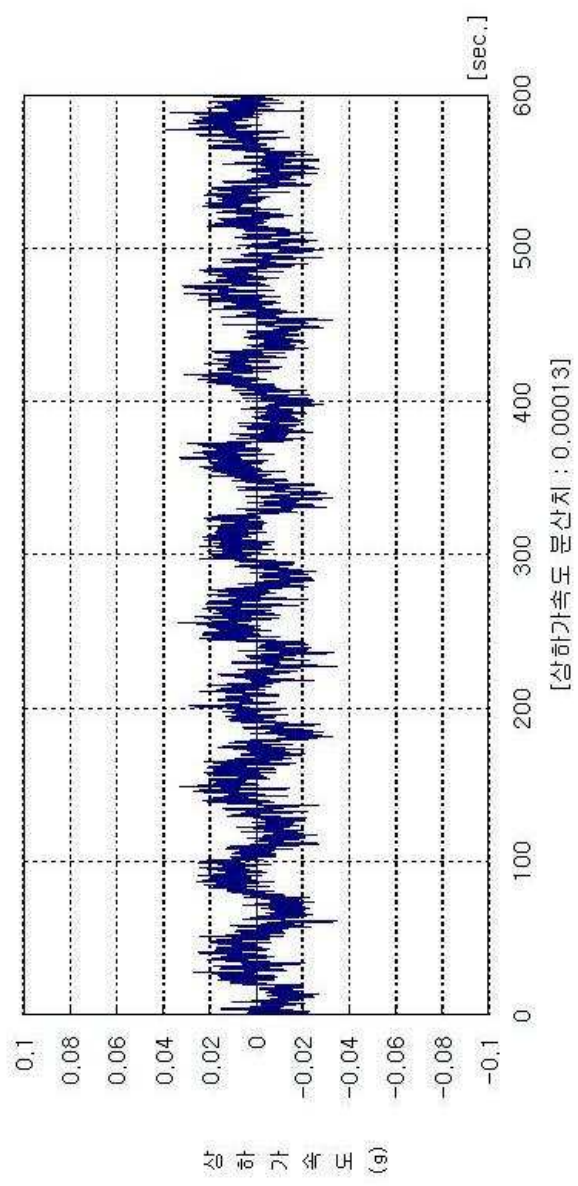


Fig. 4-22 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(1)]

[File:03191350 선속 14.0 kts, B.F. No.4, 만남각 055°, 저장시간 10분]

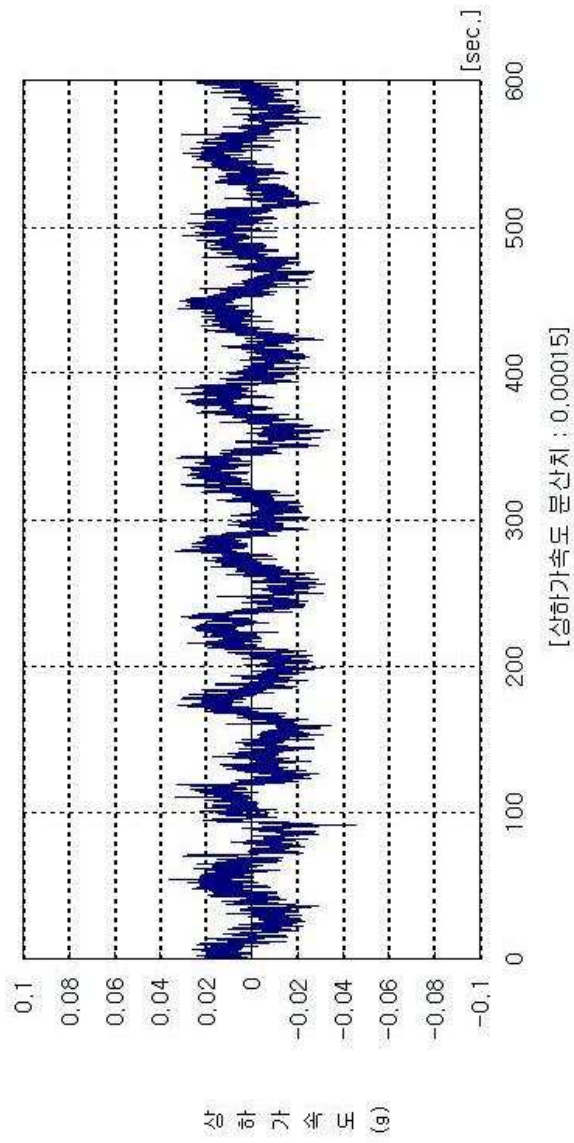


Fig. 4-23 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅰ)]



[File:03190010, 선속 13.8 kts, B.F. No.5, 만남각 080°, 저장시간 10분]

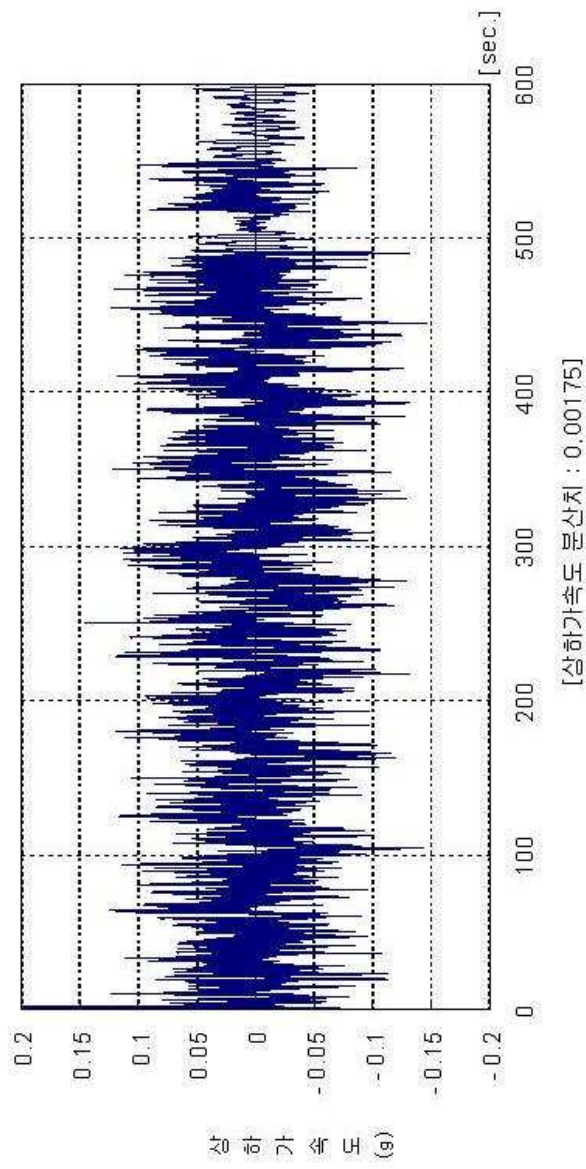


Fig. 4-24 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]

[File:13190020, 선속 13.5 kts, B.F. No.5, 만남각 030°, 저장시간 10분]

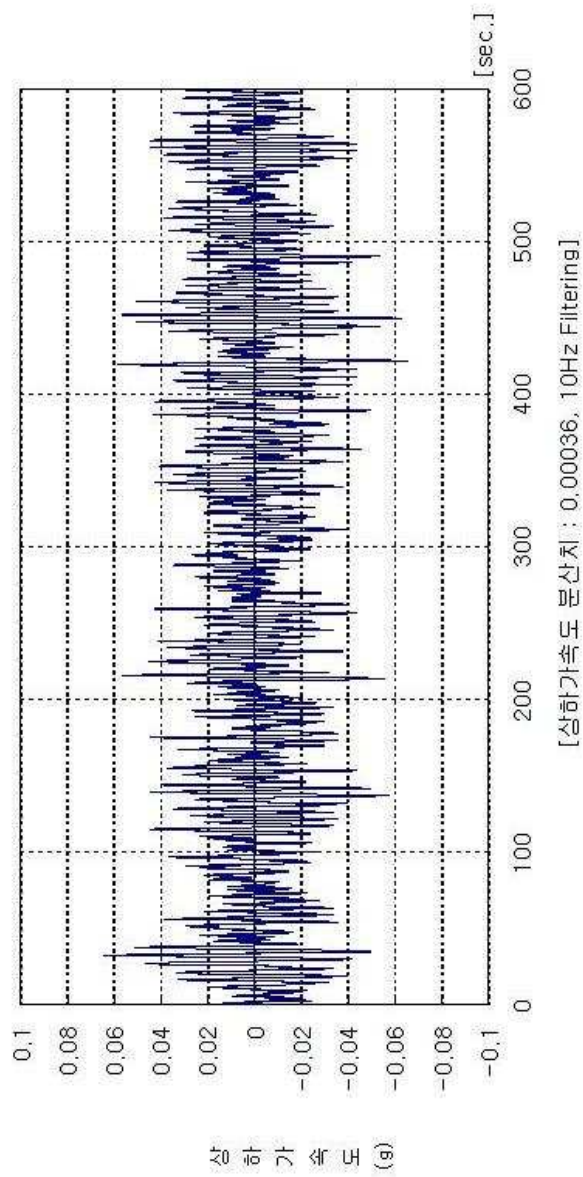


Fig. 4-25 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(I)]



[File:03190020, 선속 13.5 kts, B.F. No.5, 만남각 030°, 저장시간 10분]

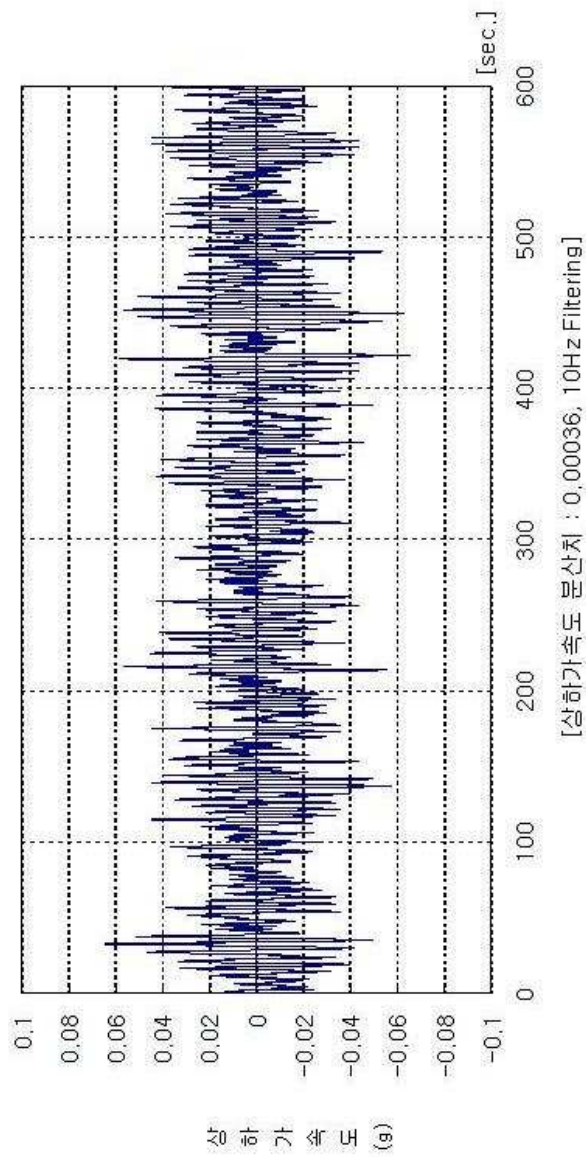


Fig. 4-26 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]

[File:03190045, 선속 14.0 kts, B.F. No.6, 만남각 080°, 저장시간 10분]

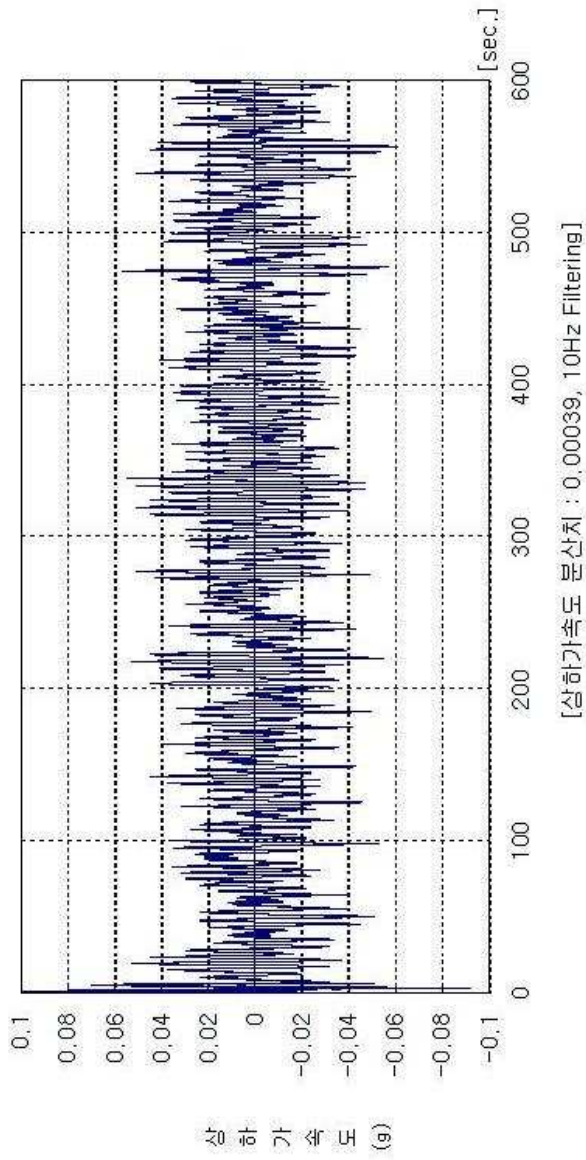


Fig. 4-27 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )]

[File:03190045, 선속 14.0 kts, B.F. No.6, 만남각 080°, 저장시간 10분]

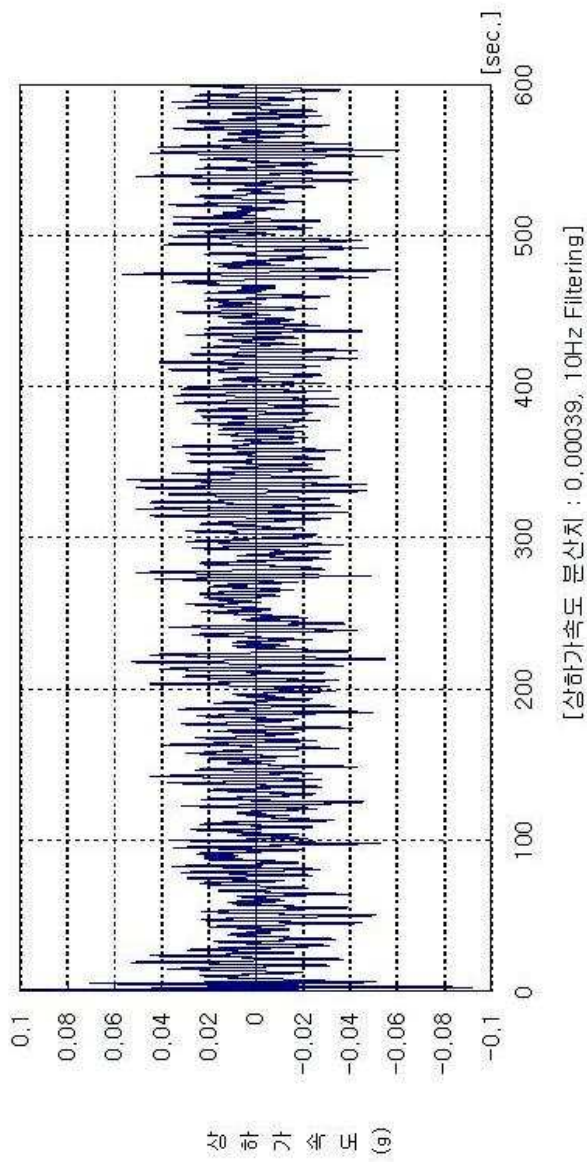


Fig. 4-28 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )]

[File:03190150, 선속 13.6 kts, B.F. No.7, 만남각 150°, 저장시간 10분]

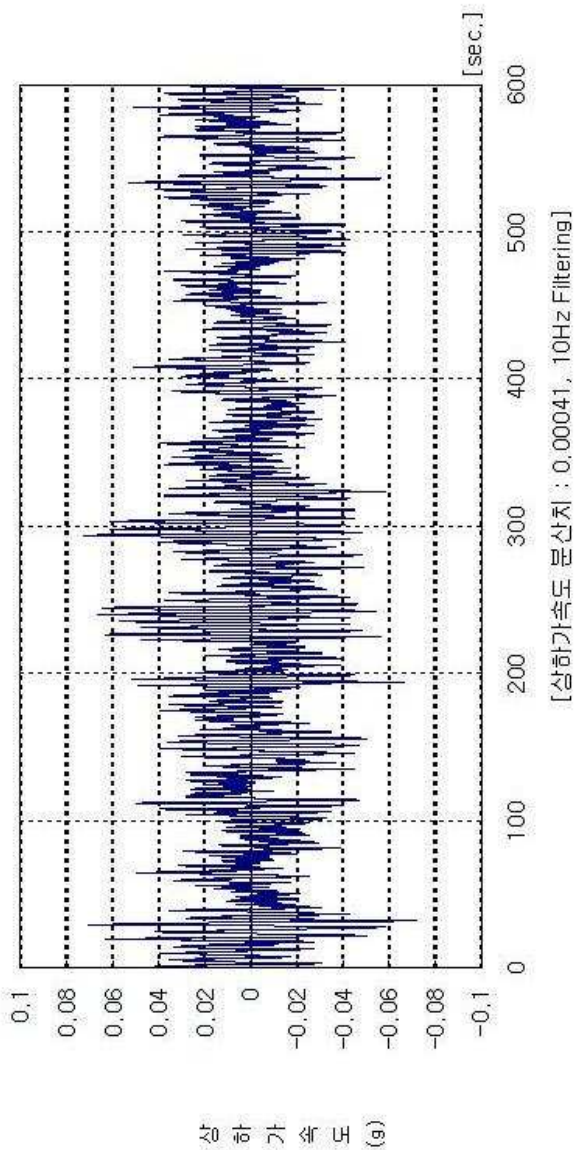


Fig. 4-29 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]

[File:03190205, 선속 15.0 kts, B.F. No.4, 만남각 070°, 저장시간 10분]

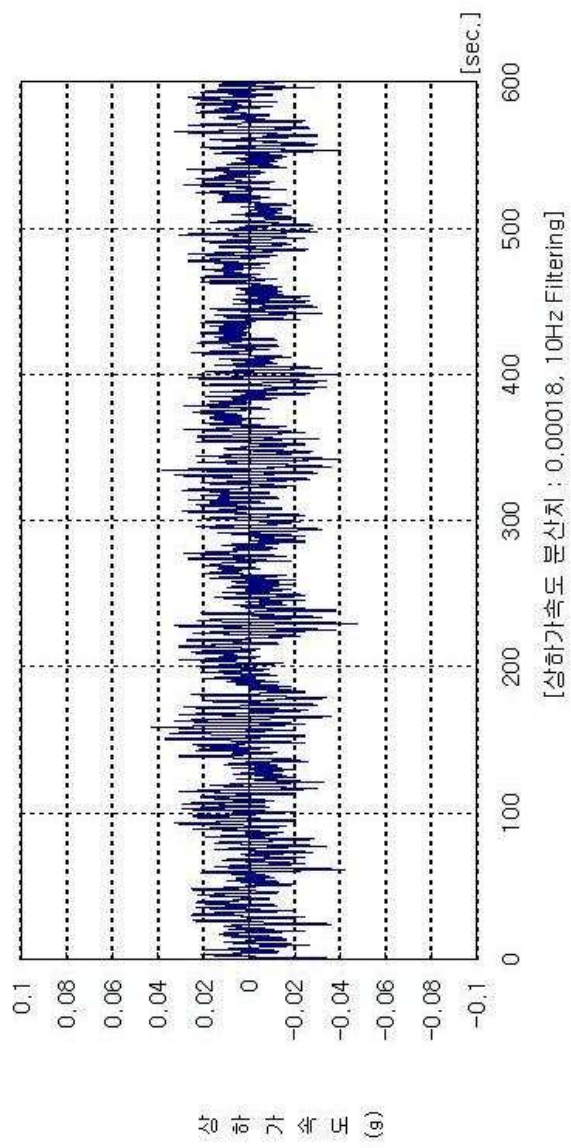


Fig. 4-30 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]



[File:03190220, 선속 15.2 kts, B.F. No.3, 만남각 000°, 저장시간 10분]

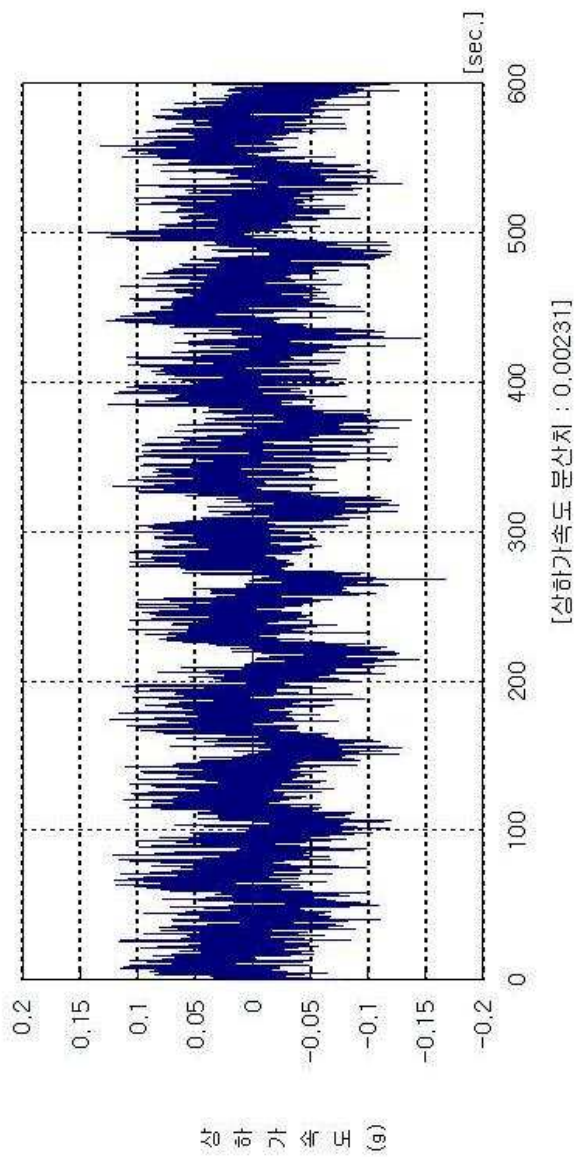


Fig. 4-31 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅰ)]

[File:03190230, 선속 15.2 kts, B.F. No.3, 만남각 000°, 저장시간 10분]

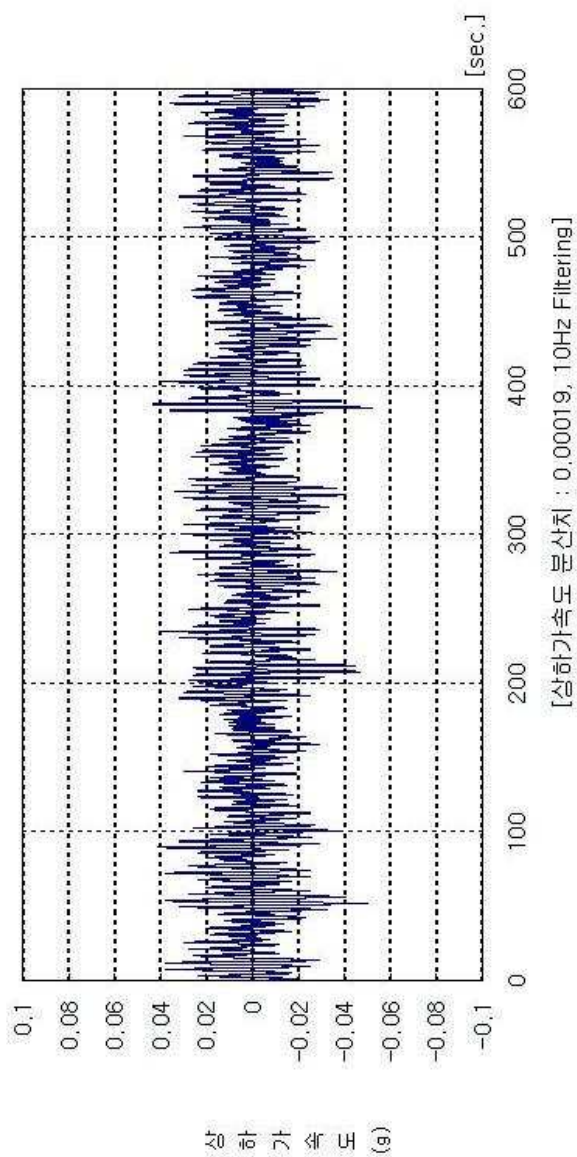


Fig. 4-32 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅰ)]

[File:03190330, 선속 15.3 kts, B.F. No.6, 만남각 115°, 저장시간 10분]

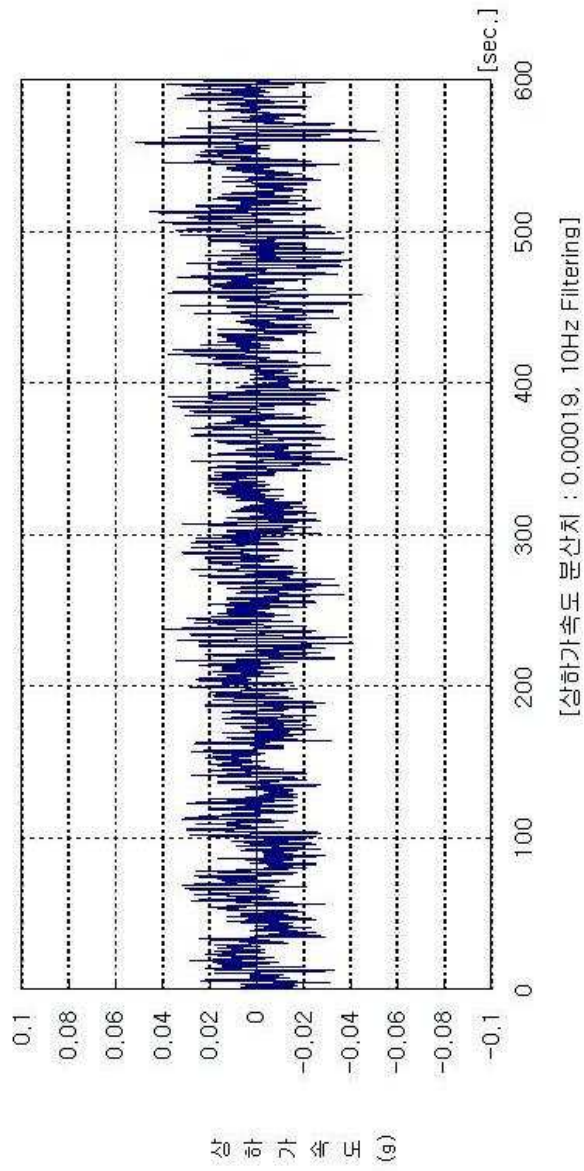


Fig. 4-33 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(I)]



[File:03190330, 선속 15.3 kts, B.F. No.6, 만남각 115°, 저장시간 10분]

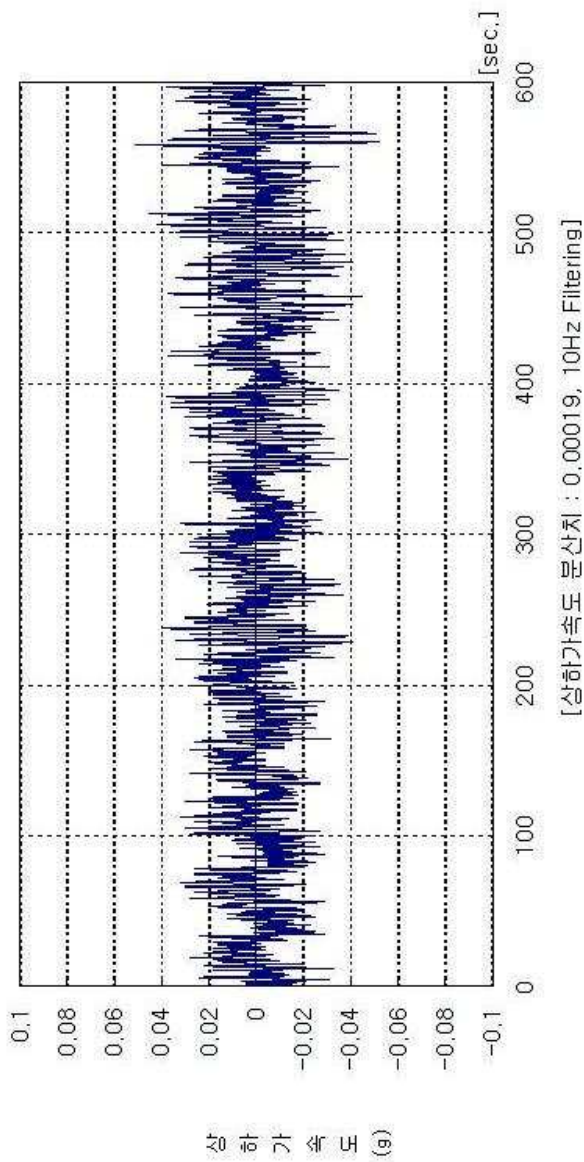


Fig. 4-34 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]

[File:03191250, 선속 13.9 kts, B.F. No.4, 만남각 065°, 저장시간 10분]

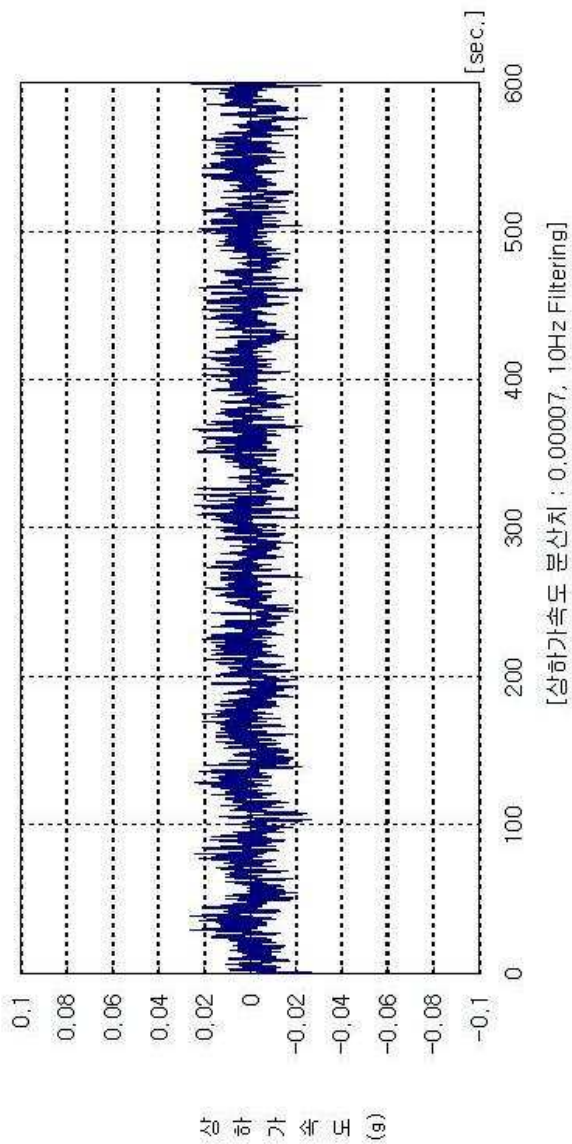


Fig. 4-35 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]

[File: 03191305, 선속 13.9 kts, B.F. No. 4, 만남각 065°, 저장시간 10분]

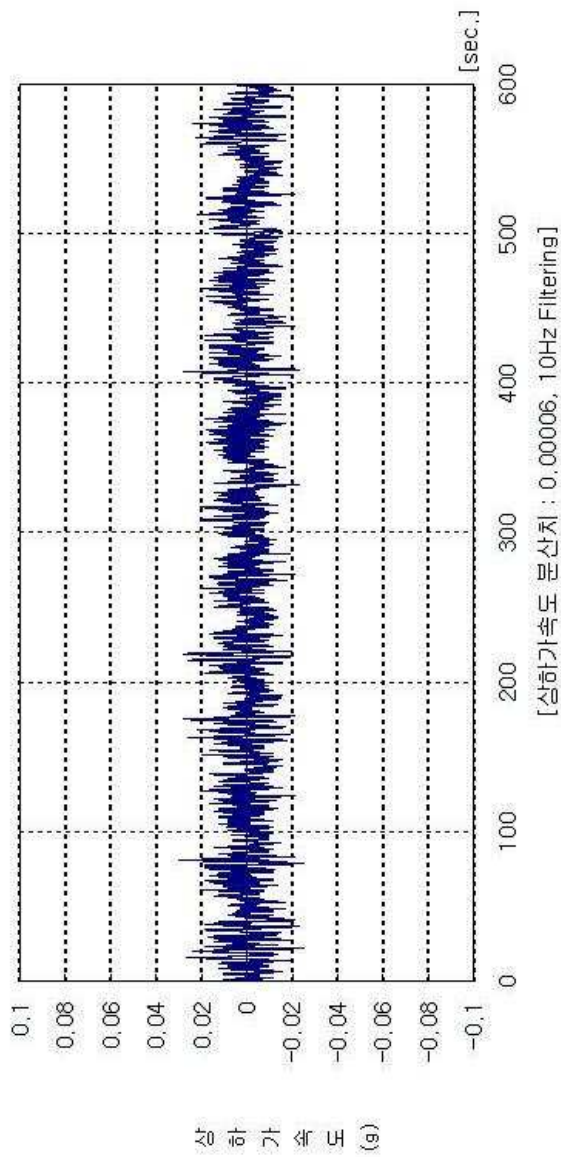


Fig. 4-36 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(I)]

[File:03191405, 선속 14.3 kts, B.F. No.4, 만남각 060°, 저장시간 10분]

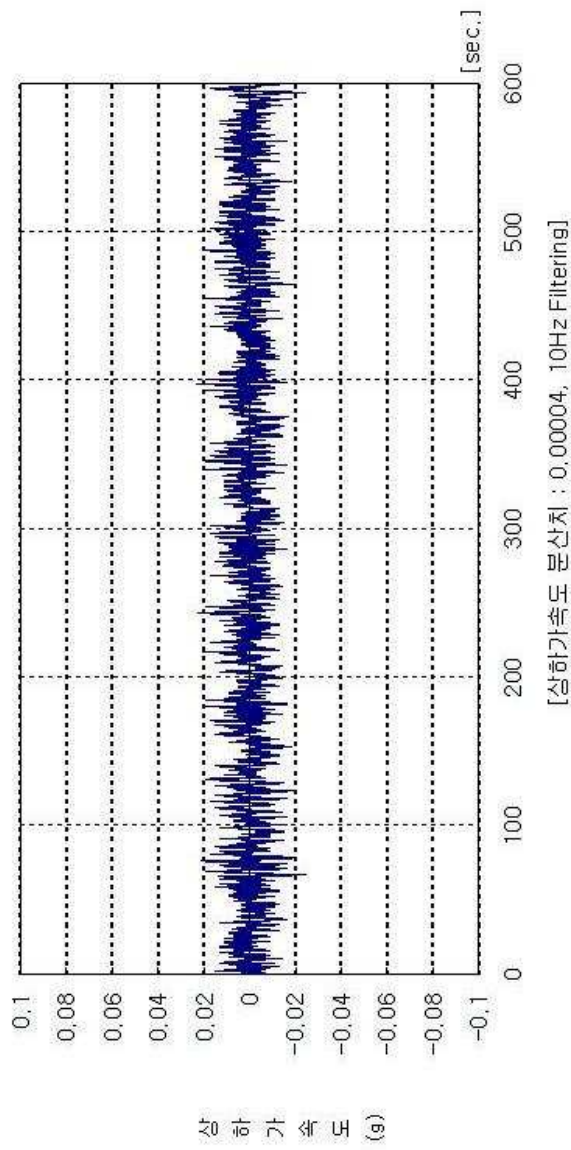


Fig. 4-37 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅱ)]

[File:03191415, 선속 14.5 kts, B.F. No. 4, 만남각 060°, 저장시간 10분]

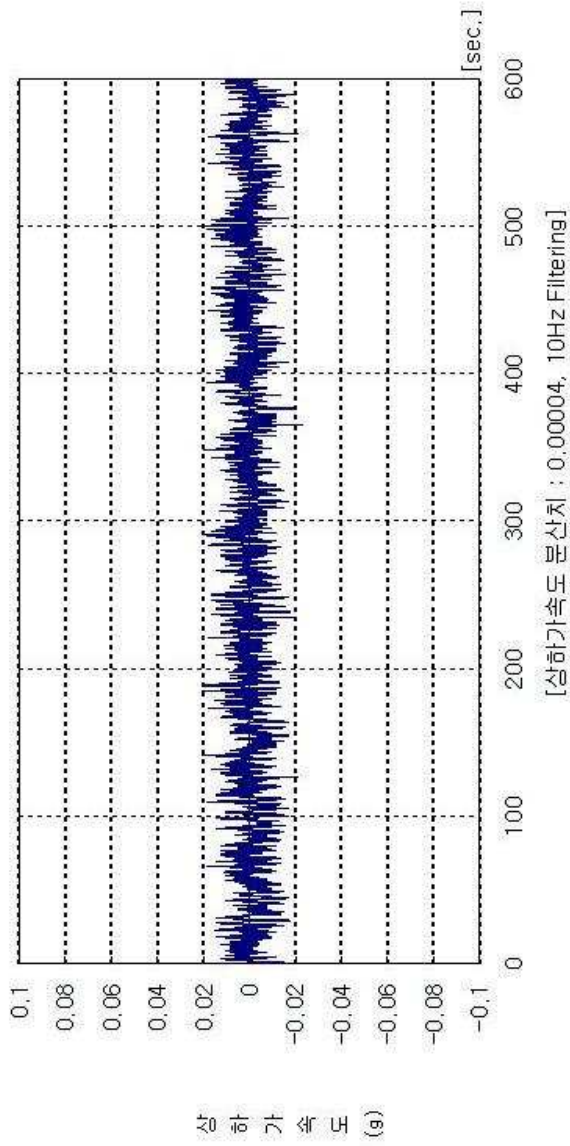


Fig. 4-38 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety(Ⅰ)]

[File:03191430, 선속 14.8 kts, B.F. No. 4, 만남각 060°, 저장시간 10분]

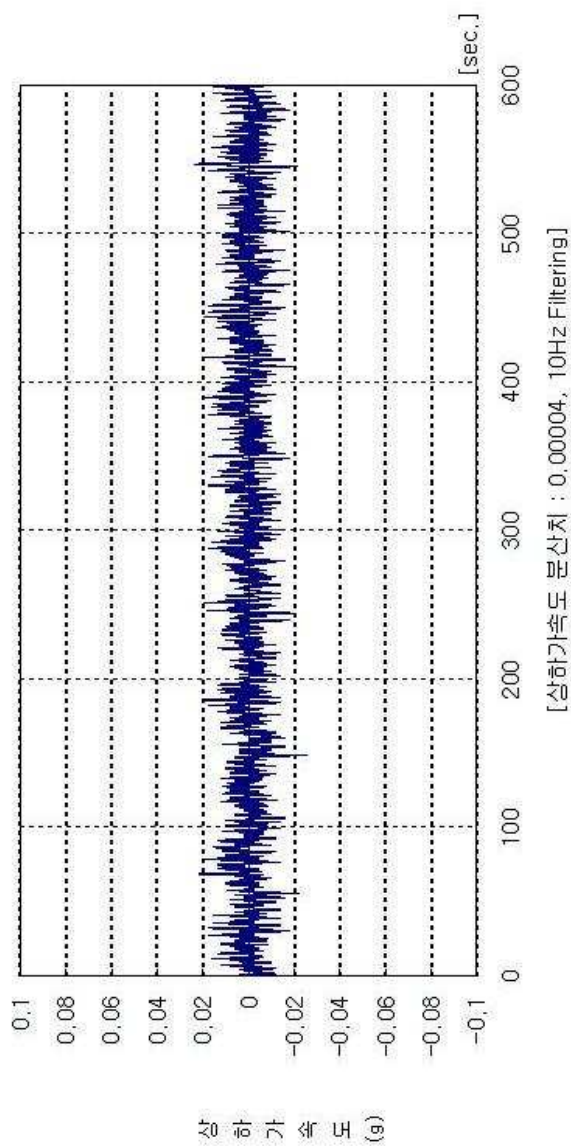


Fig. 4-39 Time series data of vertical acceleration [evaluation system of navigation safety( I )]



[File:03190035, 선속 14.0 kts, B.F. No.6, 만남각 150°, 저장시간 10분]

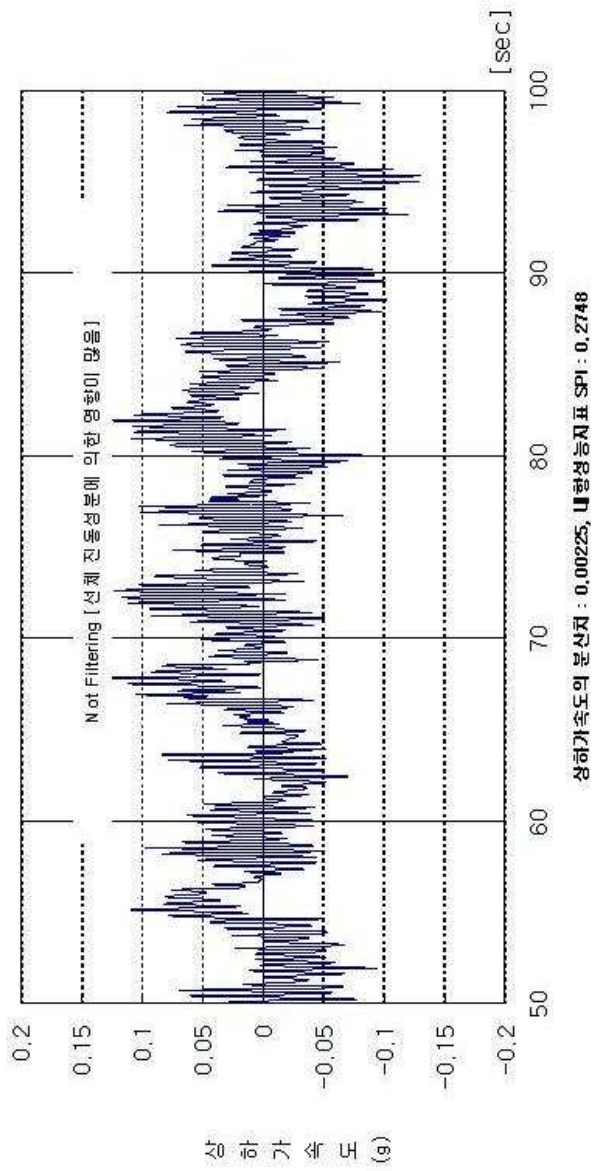


Fig. 4-40 Time series data measured by evaluation system of navigation safety(Ⅱ)  
[not filtering for low frequency band]

[File:03190045, 선속 14.0 kts, B.F. No.6, 만남각 150°, 저장시간 10분]

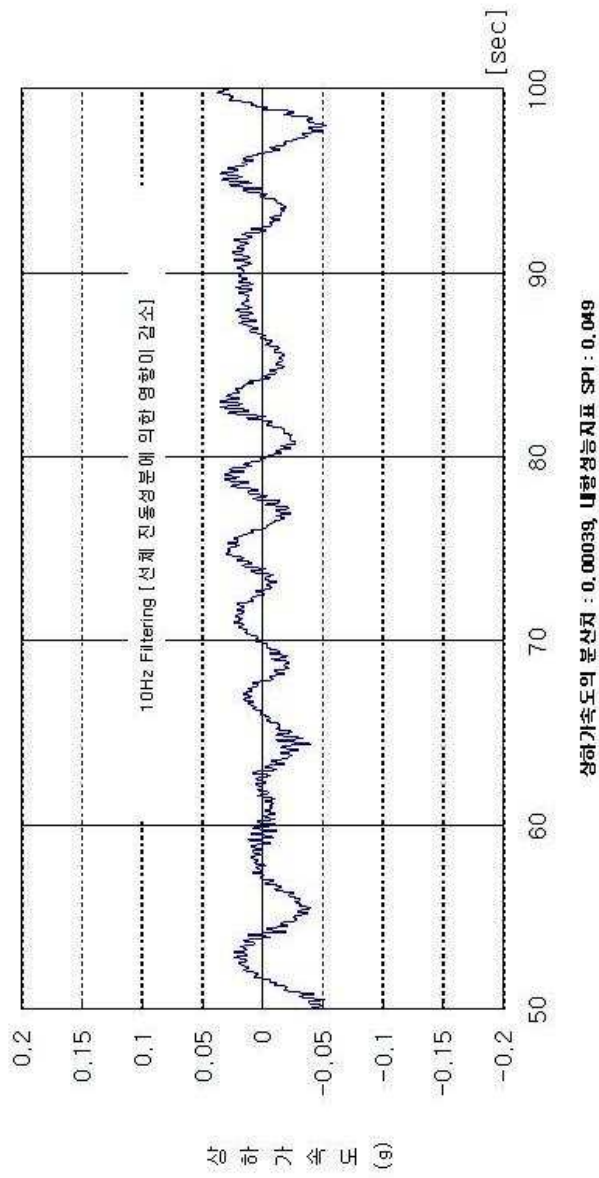


Fig. 4-41 Time series data measured by evaluation system of navigation safety(Ⅱ)  
[filtering for low frequency band]



항해안전성 평가시스템 (1)

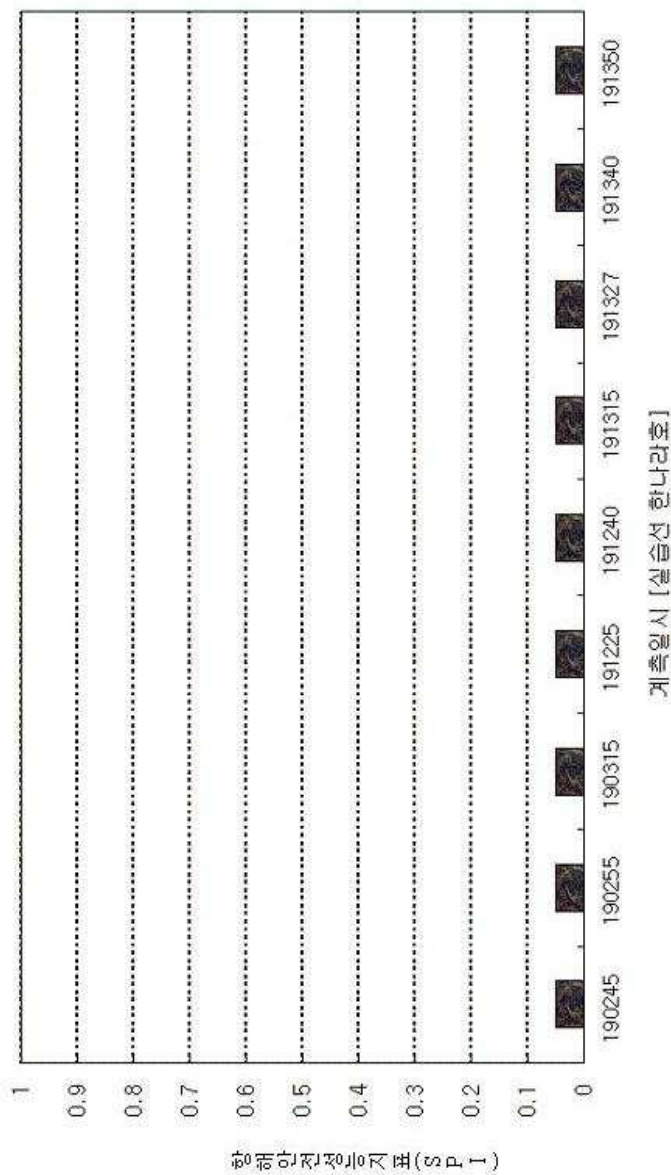
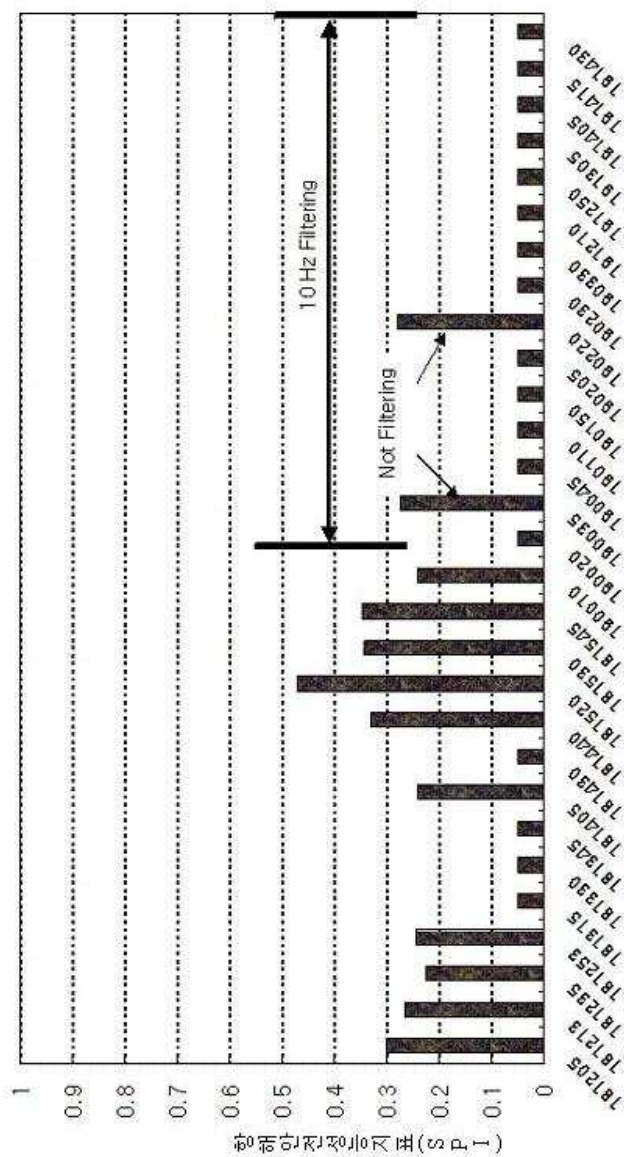


Fig. 4-42 Passage chart of navigation safety evaluation system(1)

# 항해안전성 평가시스템 (Ⅱ)



계측일시 [실습선 한나라호]

Fig. 4-43 Passage chart of navigation safety evaluation system(I)

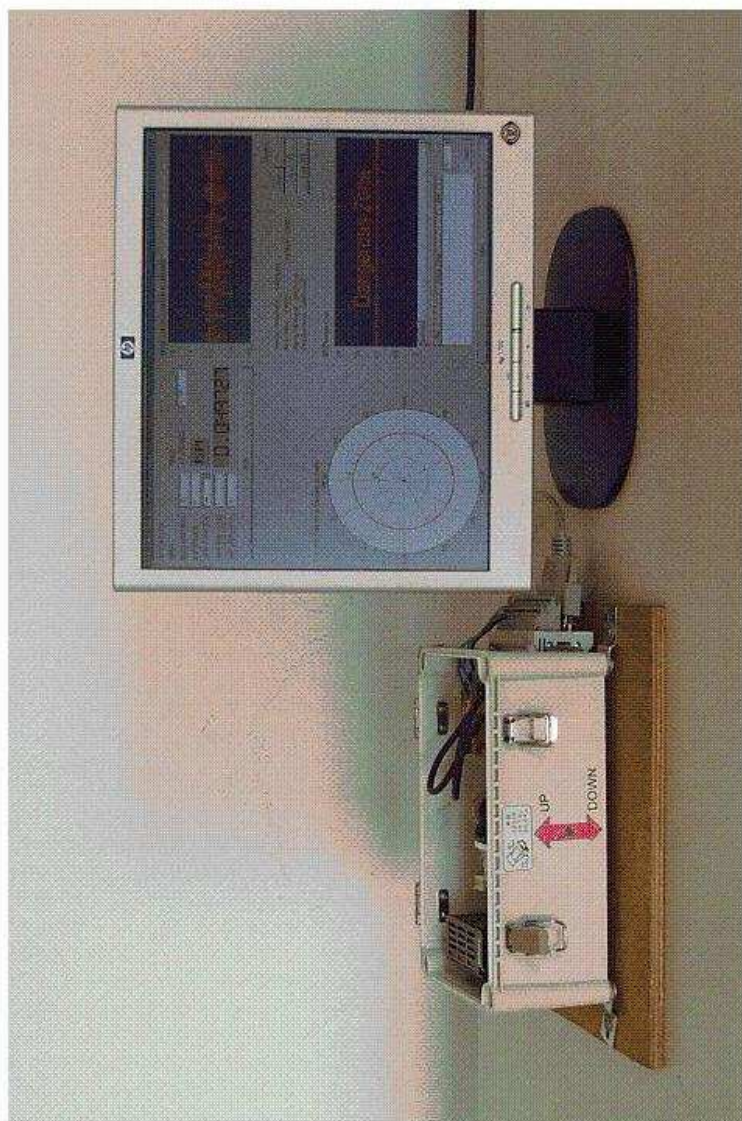


Fig. 4-44 Navigation safety evaluation system(1)



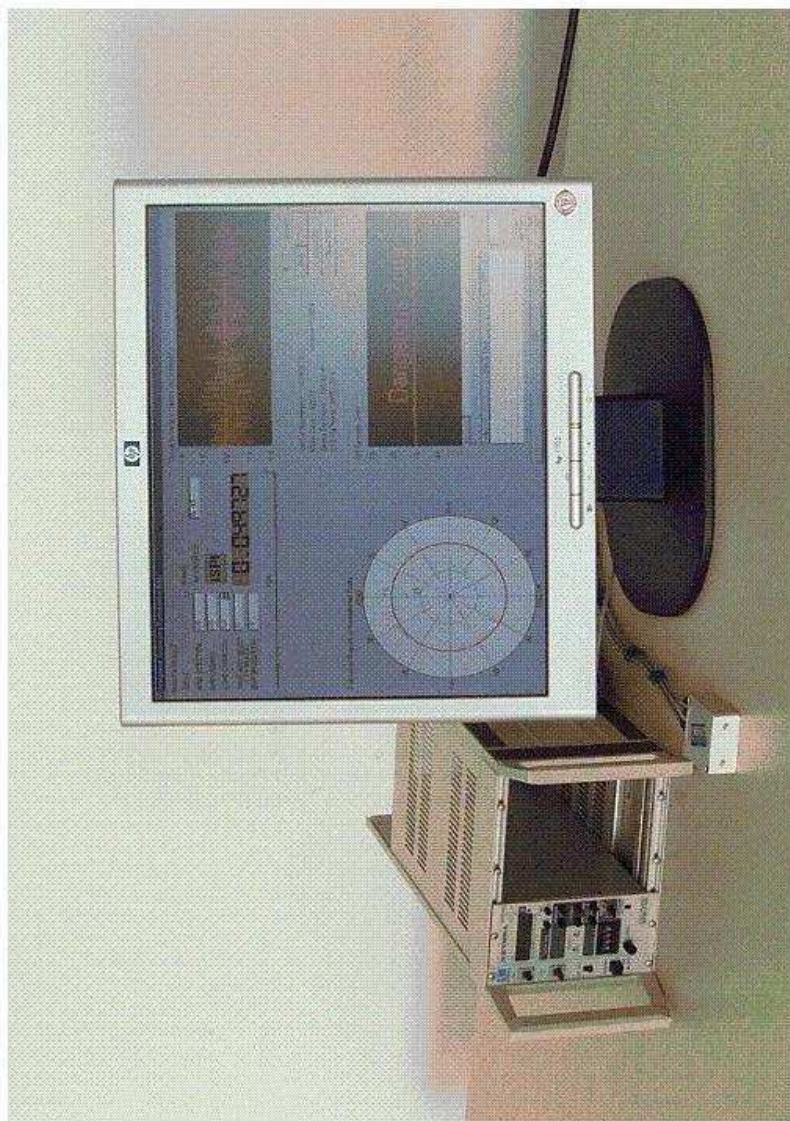


Fig. 4-45 Navigation safety evaluation system( I )

## 제 5 장 결 론

선박의 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템을 개발하기 위하여 행한 본 연구의 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 과량 중을 항해하고 있는 선박의 항해안전성을 평가하기 위하여 선체운동 가속도 계측 장치를 탑재하여, 기존의 내항성능 평가요소 중 상하가속도 한 개의 요소만을 계측함으로써 선박 전체의 내항성능을 종합적으로 평가할 수 있는 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템을 개발하였다.
- (2) 현재까지 가상 시뮬레이션이나 항해 운항실적만을 가지고 평가해 오던 선박의 내항성능을 실제 계측시스템을 탑재하여 실시간으로 평가하였다. 실선 계측 결과를 토대로 내항성능을 예측하고 모니터링 할 수 있는 선박 전체의 종합적인 항해안전성 평가가 가능하게 되었다.
- (3) 선장 및 항해사의 항해 판단 지원 시스템으로서 위험한 상태에서 벗어나기 위해서 필요한 변침 및 선속의 조절량과 같은 정량적인 데이터를 제공할 수 있도록 개발하였다. 이는 선박의 항해안전성 평가 결과를 선박운항자가 한 눈에 쉽게 판단할 수 있는 선박운항자에게 익숙한 평가도를 개발하여 컴퓨터 화면 상에 화상 처리하였고, 실선 계측에 의한 평가 결과를 실시간으로 전시할 수 있는 시스템이다.
- (4) 국제해사기구(IMO)에서 채택하고 있는 항해기록장치(VDR : Voyage Data Recorder)에 가속도 계측 데이터를 추가 데이터로 하는 차세대 VDR을 제안 할 수 있는 이론적 근거를 마련하였다. VDR에 기록된 선체 가속도 변

화량을 통하여 계측 당시의 해상 상태 등을 재연할 수 있는 기술을 확보함으로써, 해양사고 당시의 정확한 선박 운항 상태를 파악하고 해석하는 기술을 확보할 수 있는 토대를 마련하였다

향후 계속되어야 할 연구과제로는 다양한 선종, 선형과 해상 상태에서의 실선 계측·평가 데이터베이스를 구축하여 그 결과를 수치계산에 환류시켜 이론적인 부분의 타당성을 보정하여야 할 것이다.

또한, 항해안전성과 더불어 정박 중 계류안전성의 평가가 가능한 다양한 계측·평가 시스템의 개발에 대한 연구가 계속하여 이루어져야 할 것으로 생각된다.

본 연구 개발 결과는 운항 선박의 안전성과 경제성 면에서 기상 정보에 의한 24시간 또는 48시간 이후의 선박 운항 상태를 예측하고 모니터링 하여, 운항 선박의 ETA 및 연료소모량의 추정이 가능한 실 해역에서 운항 선박의 최적 항로 계획 수립을 지원하고 평가할 수 있는 시스템 개발 등에 이용될 수 있을 것이다. 더불어, 항해안전성과 함께 정박 중의 계류안전성을 평가할 수 있도록 선박의 경사, 변위 등을 계측할 수 있는 다기능 계측시스템의 개발에 관한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 福地信義 外 : 船舶の近代化における安全性・信頼性確保のための安全論とシステム設計, 西部造船学会 第99回 論文集, 2000.3
- (2) Kong.G.Y, Lee. C.R, Kim.S.K, On the Development of an Information Service System for Navigational Safety of Seagoing Vessels, LNCS 2402, pp. 273-283, 2002.8
- (3) 김순갑, 이충로, 공길영 : 선박의 종합내항성능 평가정보제공시스템 개발에 관한 연구, 한국항해학회지, 제25권 3호, pp.247-256, 2001
- (4) 湯浅通史 : 船体監視システム役割とその適用について, 日本造船学会論文集 第186号, 1982.9
- (5) Comstock E.N.·Bales S. L.·Keane R.G. : Seakeeping in Ships Operations, Proc. 5th SNAME STAR Symp., 1980. 6
- (6) 공길영, 이상민, 김철승 : 선박 탑재형 내항성능 평가시스템 개발 (1), 한국항해항만학회지, 제28권 1호, pp.1-8, 2004
- (7) 김철승, 정창현, 김순갑, 공길영, 설동일, 이윤석 : 연안 여객선의 내항성능 위험도를 이용한 항해 안전성 평가에 관한 연구, 한국해양환경안전학회지, 제9권 1호, pp.41-50, 2003
- (8) Heeyong Lee, Gilyong Kong, Sihwa Kim, Taechul Lee : Optimum Ship Routing and It's Implementation on the Web, 제LNCS 2402권(집), PP. 125-136, 2002
- (9) 細田龍介·小山初見 等 : 船舶の初期設計における耐航性能の総合的評価に関する研究(第1報), 日本造船学会集(第153号), 1983. 5
- (10) 細田龍介·小山初見 等 : 船舶の初期設計における耐航性能の総合的評価に関する研究(第2報), 日本造船学会集(第154号), 1983. 11
- (11) Comstock E.N.·Keane R.G. : Seakeeping by Design, Naval Engineers

Journal, Vol. 92, No. 2, 1980. 4

(12) 김순갑, 공길영 : 선박의 항해중 종합내항성능지표에 관한 연구, 한국항해학회지 제21권 제2호, 1997.6

(13) Gil-Yong Kong, Yun-Sok Lee, Sang-Min Lee : A Study on the Modeling of Transitional Lateral Force Acting on the Berthing Ship by CFD, PP..1196~1202, KSME International Journal, 제18권(집) 제7호, 2004

(14) 이상민, 공길영, 김철승 : 몰수평판에 작용하는 Radiation 유체력에 관한 연구, 한국항해항만학회지, 제28권 3호, pp.199-205, 2004

(15) 高木乾雄 : 運動性能の研究動向-耐航性に関する研究-, 日本造船学会誌, 第756号, pp. 54-57, 1992.

(16) 溝口純敏 : 運動性能の研究動向-耐航性に関する研究-, 日本造船学会誌, 第774号, pp. 33-37, 1993.

(17) 斎藤公男 : 運動性能の研究動向-耐航性に関する研究-, 日本造船学会誌, 第788号, pp. 35-40, 1995.

(18) 平山次清 : 運動性能の研究動向-耐航性に関する研究-, 日本造船学会誌, 第808号, pp. 45-51, 1996.

(19) 内藤 林 : 耐航性における非線型問題, 日本造船学会紙, 829号, 1998. 7

(20) 影本 浩 : 耐航性に関するCFDの現状, 日本造船学会紙, 835号, 1991. 1

(21) H.Hashimoto, N.Umeda and A.Matsuda : Importance of several nonlinear factors on broaching prediction, Journal of Marine Science and Technology, No.2, pp.145-155, 2004. 7

(22) M.Levadou and L.Palazzi : Assessment of Operational Risks of Parametric Roll, Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.111, pp.517-534, 2004. 12

(23) Y.S.Shin, V.L.Belenky, W.M.Lin, K.M.Weems, W.F.Belknap and A.H.Engle : Nonlinear Time Domain Simulation Technology for Seakeeping and Wave-Load Analysis for Modern Ship Design, Transaction of Society



of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.111, pp.557-578, 2004. 12

(24) Bruce L Hutchison : Joint Seakeeping Response Processes for Determining Structural Loads, Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.110, pp.189-214, 2002. 12

(25) Robert F.Beck and Arthur M.Reed : Modern Computational Methods for Ships in a Seaway, Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.109, pp.1-52, 2001. 12

(26) Paul D.Sclavounos and Henning Borgen : Seakeeping Analysis of a High Speed Monohull with a Motion-Control Bow Hydrofoil, Journal of Ship Research, Vol. 48, No.2, pp.77-117, 2004. 6

(27) C.Maury, G.Delhommeau, M.Ba, J.P.Boin and M.Guilbaud : Comparison between Numerical Computations and Experiments for Seakeeping on Ship Models with Forward Speed, Journal of Ship Research, Vol. 48, No.4, pp.347-364, 2004.12

(28) 窪田徹也, 新開明二 : 高精度船体運動計測システムの開発ー 6 軸&方位センサの収集システムの構築ー, 西部造船学会 第101回 論文集, 2000. 3

(29) 高石敬史・高利伊三夫・宮本武 : ストリップ法計算の比較と解析, 日本造船学会, 運動性能研究委員会 第1回シンポジウム, 1986.12

(30) 溝口純敏 : ストリップ法その周邊, 日本造船学会誌, 第61年5月, 1988.5

(31) 공길영 : 항해중 선박의 속도 감소에 관한 연구, 한국항해항만학회지, 제23권 1호, pp.1-13, 1999

(32) 김순갑·공길영 : 선박의 속도저하를 고려한 내항성능 평가에 관한 연구, 해양안전학회지, 제2권 제1호, 1996. 1

(33) Naito S.・Nakamura S.・Hara S. : On the Prediction of Speed Loss of a Ship in Waves, Naval Arch. & Ocean Eng., Vol.18, 1980

(34) Townsin R.L.・Kwon Y.J. : Approximate Formulae for the Speed Loss due to Added Resistance in Wind and waves, RINA, No.125, 1983.7

- (35) 공길영, 김철승 : 황천항해중인 선수선교선의 내항성능평가기준 설정 방안에 관한 연구, 한국해양환경안전학회지, 제7권 3호, pp.17-28, 2001
- (36) 공길영, 김철승, Hiroyuki Sadakane : 선회중 전복한 저건현 내항 탱커의 복원성에 관한 연구 (1), 한국항해항만학회지, 제26권 1호, pp.1-7, 2002
- (37) 김철승, 공길영, 김순갑 : 선회중 전복한 저건현 내항 탱커의 복원성에 관한 연구 (2), 한국항해항만학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp.145-153, 2002
- (38) 김순갑·박문수·공길영 : 선박 종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제18권, 제2호, 1994
- (39) 김순갑·김병진·이충로 : 벌크선의 적화상태에 따른 항해안전성 평가에 관한 연구, 해사산업연구소, 1993.8
- (40) Peyton Z. Peebles : Probability, Random Variables, and Random Signal Principles, McGRAW-Hill Inc., pp.116- 127, 1980
- (41) A. G. Colombo·A. Z. Keller : Reliability Modelling and Application, D. Reidel Publishing Company, pp. 99 - 137, 1987
- (42) Mohamed S. Abdel-Hameed·Erhan Cinlar · Jeseoph Quinn : Reliability Theory and Models, Academic Press Inc., pp. 3 - 65, 1984
- (43) Rafael L. Bras·Ignacio Rodriguez-Iturbe : Random Functions and Hydrelogy, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 282 - 288, 1985
- (44) 元良成三 : 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂, P50, 1992
- (45) 김순갑, 이상민, 이충로 : 실시간 기상정보를 이용한 선박의 종합내항성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제22권 제2호, 1998.2
- (46) 三宅竜二 外 : 大波高波浪中を航行する大型コンテナ船の波浪荷中に関する研究, 日本造船学会論文集 Vol.195, 2004.6
- (47) 김순갑 : 선박의 파랑중 항해능력 및 추진성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제14권 제2호, 1990.6
- (48) 山内保文 : 不規則 現象論, 海文堂, pp. 6 - 29, 1986
- (49) A.R.J.M. LLOYD : Seakeeping ; Ship Behaviour in Rough Weather,

Ellis Horwood Limited, pp. 409 - 473, 1989

(50) 関西造船協会編 : 造船設計便覧(第4版), pp. 422 - 434, 1983

(51) Edward V. Lewis : Principles of Naval Architecture, SNAME, pp. 137 - 159, 1989

(52) 金順甲・内藤 林・中村彰一 : 船舶の波浪中耐航性能評価に関する研究, 日本造船学会論文集, No.155(1984)

(53) Lewis E.V. : The Status of Merchant Ship Seakeeping Reserch, Proc.19th ATTC, Vol.1, 1980.7

(54) Nakamura S.・Hosoda R. : A Method for Predicting the Power in a Seaway, Proc.14th ITTC, Vol.4, 1975

(55) Ochi, M.K.・Motter L.E. : Prediction of Slamming Characteristic and Hull Responses for Ship Design, Trans. of SNAME, Vol81, 1973

(56) Bishop, R.E.D.・Price W.G.・Tam P.K.Y. : On the Dynamics of Slamming, Trans. of RINA, Vol.120, 1978

(57) 中村彰一 : 耐航性の諸要素, 第1回 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 1969

(58) 細田龍介・黒井昌明 : 最適航法,第2回耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 1977

(59) Aertssen G.・Sluijs M.F. : Service Performance and Seakeeping Trials on a Containership. TRINA, Vol.114,

(60) 김순갑・이충로 : 황천시의 항해안전 평가시스템 개발에 관한 연구, 한국항해학회지, 제15권 제1호, 1990

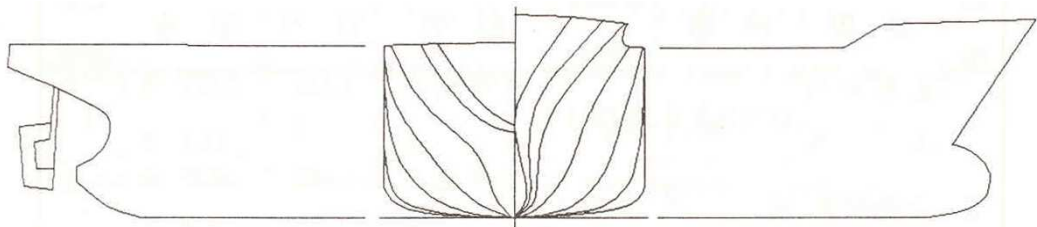
(61) J. N. Newman : Marine Hydrodynamics, MIT Press, pp. 328 - 373, 1980

(62) 高木又男・新井新一 : 船舶・海洋 構造物の耐波理論, 成山堂書店, PP. 269 - 274, 1996

(63) 三根久・河合一 : 信頼性・保全性の数理, 朝倉書店, pp.90 - 152, 1982

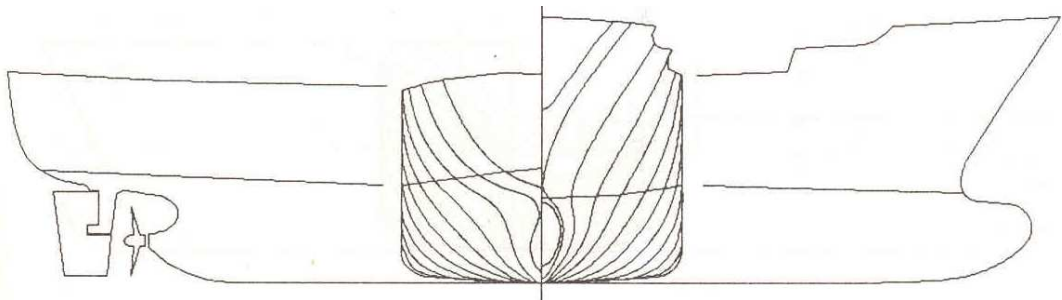
(64) 조익순, 이충로, 김순갑 : 선박탑재용 종합내향성능 평가시스템 개발을 위한 기초적 연구, 한국항해학회지, pp 103 - 111, 2000. 6

【부록1】 Principal particulars of container ship



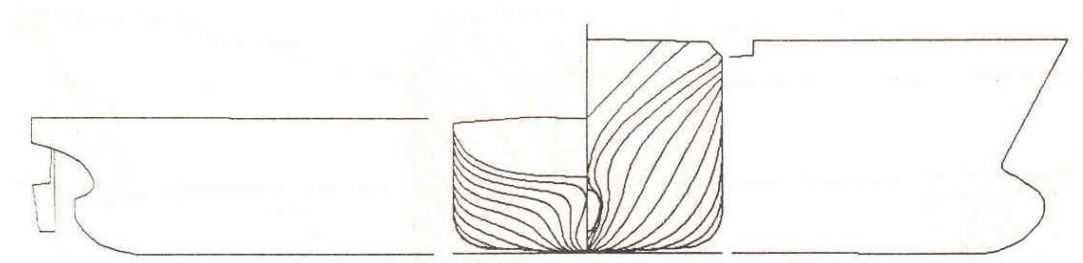
I T E M S		DIMENSION
Length P.P.	Lpp(m)	175.00
Breadth	B(m)	25.40
Depth	D(m)	15.40
Mean draft	d <sub>m</sub> (m)	9.50
Displacement volume	(m <sup>3</sup> )	24,742.00
Block coefficient	C <sub>b</sub>	0.572
Length-breadth ratio	L/B	6.89
Breadth-draft ratio	B/D	2.67
Height of C.G.	KG(m)	9.52
Metacentric height	GM(m)	1.00
Rolling period	T <sub>R</sub> (sec)	18.00
Propeller diameter	D <sub>p</sub> (m)	6.50
Propeller pitch ratio	p	1.055

【부록2】 Principal particulars of passenger ship



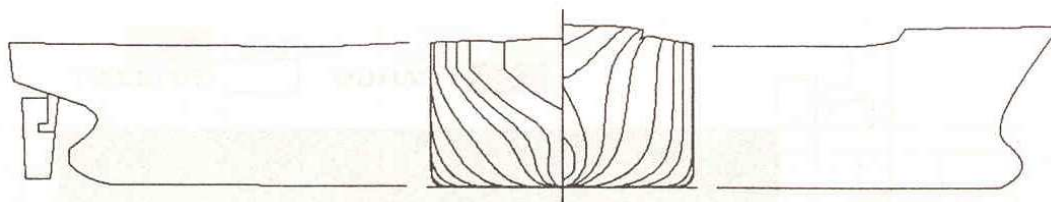
I T E M S		DIMENSION
Length P.P.	$L_{pp}(m)$	93
Breadth	$B(m)$	14.5
Depth	$D(m)$	7
Mean draft	$d_m(m)$	5.115
Displacement volume	$(m^3)$	4,274.82
Block coefficient	$C_b$	0.6028
Length-breadth ratio	$L/B$	6.414
Breadth-draft ratio	$B/D$	2.835
Height of C.G.	$KG(m)$	5.033
Metacentric height	$GM(m)$	1.355
Rolling period	$T_R (sec)$	13.142
Propeller diameter	$D_p(m)$	3.55
Propeller pitch ratio	$p$	0.751

【부록3】 Principal particulars of pure car-carrier



I T E M S		DIMENSION
Length P.P.	$L_{pp}(m)$	164
Breadth	$B(m)$	28
Depth	$D(m)$	27.35
Mean draft	$d_m(m)$	7.83
Displacement volume	$(m^3)$	18,971.5
Block coefficient	$C_b$	0.5177
Length-breadth ratio	$L/B$	5.857
Breadth-draft ratio	$B/D$	3.576
Height of C.G.	$KG(m)$	12.53
Metacentric height	$GM(m)$	1.65
Rolling period	$T_R \text{ (sec)}$	17.48
Propeller diameter	$D_p(m)$	6
Propeller pitch ratio	$p$	0.9844

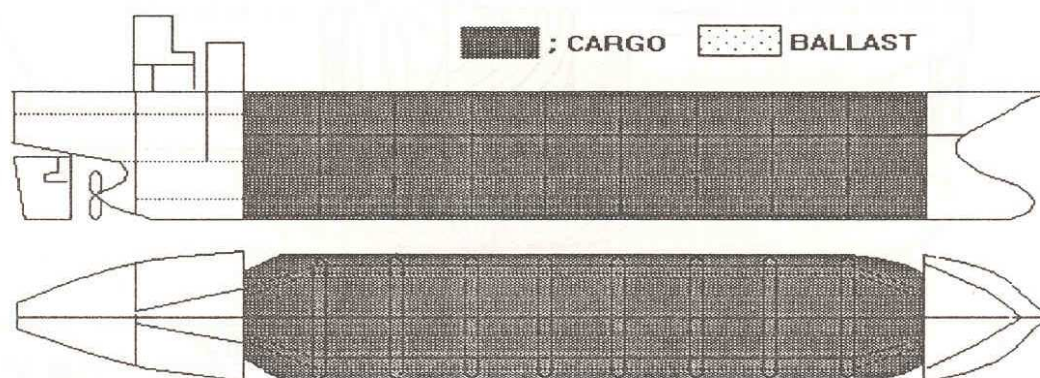
【부록4】 Principal particulars of bulk carrier



I T E M S		DIMENSION			
		CASE 1 Homo Load	CASE 2 Half Load	CASE 3 Heavy Ballast	CASE 4 Normal Ballast
Length P.P.	Lpp(m)	259.00	259.00	259.00	259.00
Breadth	B (m)	43.00	43.00	43.00	43.00
Depth	D (m)	23.80	23.80	23.80	23.80
Mean draft dm	(m)	17.417	11.950	9.506	7.653
Displacement volume	(m <sup>3</sup> )	163375.4	108605.5	85132.1	65777.6
Block coefficient	C <sub>B</sub>	0.8411	0.8411	0.8411	0.8411
Length-Breadth Ratio	L/B	6.023	6.023	6.023	6.023
Breadth-Draft Ratio	B/B	2.469	3.598	4.523	5.619
Center of Buoyancy l <sub>b</sub>		3.236	4.232	4.550	4.725
Height of C.G.	KG (m)	13.55	10.28	11.84	12.13
Metacentric height GM (m)		4.16	6.52	8.24	10.45
Rolling period T <sub>R</sub> (sec)		16.908	13.506	12.014	10.668
Propeller diameter D <sub>p</sub> (m)		8.00	8.00	8.00	8.00
Propeller pitch ratio P		0.7637	0.7637	0.7637	0.7637
Propeller Immersion (%)		219.38	156.0	141.25	114.25

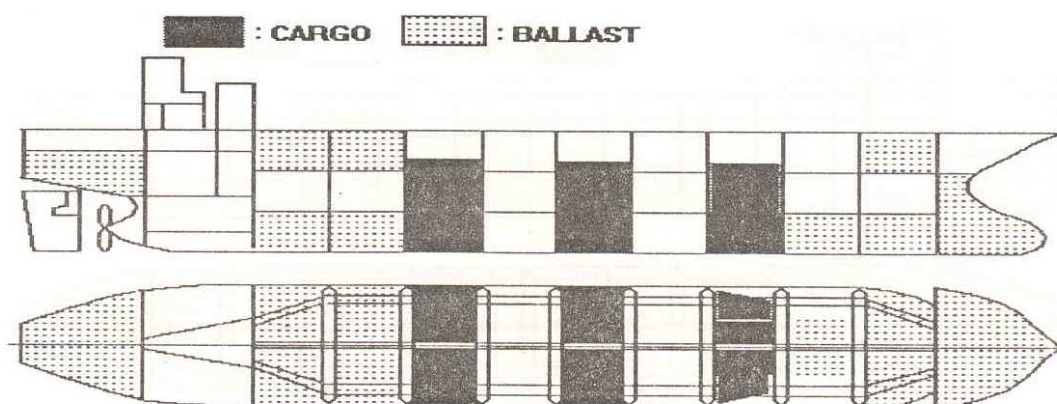


【부록5】 Homogeneous full loaded condition of bulk carrier



DEADWEIGHT ITEMS	WEIGHT (MT)	L. C. G FROM L/2 (M)	MOMENT ABOUT L/2 (MT-M)	V. C. G FROM BL (M)	MOMENT ABOUT BL (MT-M)	FREE SURFACE MOMENT (MT-M)
BUNKERING CONDITION	5154.2	- 70.61	- 363938	11.48	59170	14792
No. 1 HOLD	14092.4	105.10	470753	13.89	195720	0
No. 2 HOLD	16557.4	82.39	341609	13.21	218778	0
No. 3 HOLD	16601.0	59.06	341609	13.20	219161	0
No. 4 HOLD	16603.1	35.66	113546	13.20	219167	0
No. 5 HOLD	16421.1	12.43	113546	13.19	216588	0
No. 6 HOLD	16407.5	- 10.97	- 101209	13.23	217132	0
No. 7 HOLD	16585.4	- 34.45	- 101209	13.25	219698	0
No. 8 HOLD	16299.7	- 57.74	- 296202	13.34	217434	0
No. 9 HOLD	14999.0	- 81.16	- 296202	13.97	209547	0
A. P. T TK(C)	0.0	-119.82	0	9.03	0	8896
DEADWEIGHT	149722.8	9.00	134750	13.31	1992810	23688
LIGHT SHIP WEIGHT	17739.0	- 6.53	- 115836	15.64	277438	
DISPLACEMENT	167459.8	7.36	1232504	13.55	2269080	23688

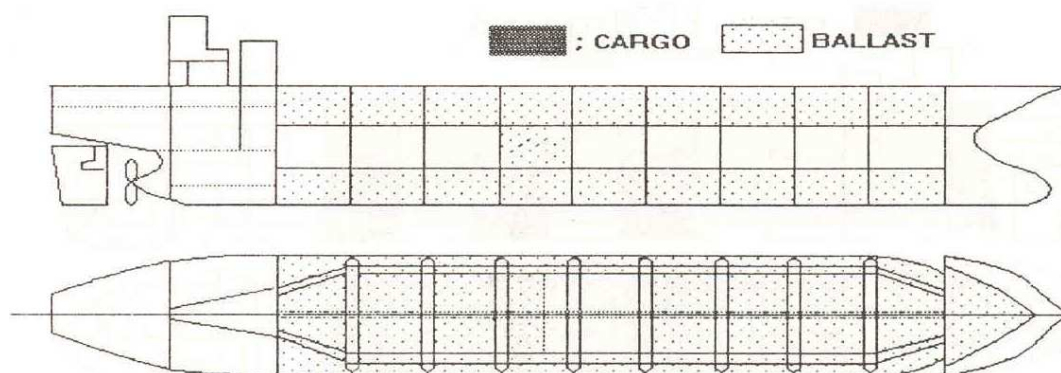
【부록6】 Homogeneous half loaded condition of bulk carrier



DEADWEIGHT ITEMS	WEIGHT (MT)	L. C. G FROM L/2 (M)	MOMENT ABOUT L/2 (MT-M)	V. C. G FROM BL (M)	MOMENT ABOUT BL (MT-M)	FREE SURFACE MOMENT (MT-M)
BUNKERING CONDITION	5154.2	- 70.61	- 363938	11.48	59170	14792
No. 3 HOLD	21773.3	59.08	1286398	9.14	199067	0
No. 5 HOLD	21537.3	12.44	267918	9.14	196878	0
No. 7 HOLD	21752.7	- 34.46	- 749505	9.21	200316	0
No. 1 DB & TSWB TK(C)	4518.0	104.20	470753	9.28	41927	92515
No. 5 DB & TSWB TK(P)	4298.8	- 68.90	- 296202	11.78	50661	14285
No. 5 DB & TSWB TK(S)	4298.8	- 68.90	- 296202	11.78	50661	14285
F. P. TK(C)	4283.2	122.42	524348	10.59	45356	12416
A. P. TK(C)	985.3	-124.65	- 122823	15.56	15330	8896
No. 2 DB & TSWB TK(P)	2490.0	69.05	171929	1.52	3795	220
No. 2 DB & TSWB TK(S)	2490.0	69.05	171929	1.52	3795	220
No. 3 DB & TSWB TK(P)	0.0	22.07	0	0.51	0	30183
No. 3 DB & TSWB TK(S)	0.0	22.07	0	0.51	0	30183
DEADWEIGHT	93581.5	11.37	1064045	9.26	866584	217993
LIGHT SHIP WEIGHT	17739.0	- 6.53	- 115836	15.64	277438	
DISPLACEMENT	111320.5	8.52	948450	10.28	1144374	217993

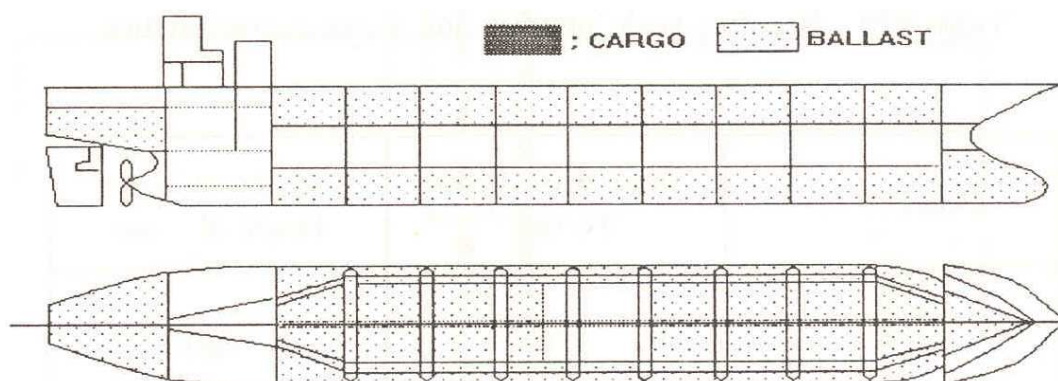


【부록7】 Heavy Ballast loaded condition of bulk carrier



DEADWEIGHT ITEMS	WEIGHT (MT)	L. C. G FROM L/2 (M)	MOMENT ABOUT L/2 (MT-M)	V. C. G FROM BL (M)	MOMENT ABOUT BL (MT-M)	FREE SURFACE MOMENT (MT-M)
BUNKERING CONDITION	5154.2	- 70.61	- 363938	11.48	59170	14792
No. 3 HOLD	21773.3	59.08	1286398	9.14	199067	0
No. 5 HOLD	21537.3	12.44	267918	9.14	196878	0
No. 7 HOLD	21752.7	- 34.46	- 749505	9.21	200316	0
No. 1 DB & TSWB TK(C)	4518.0	104.20	470753	9.28	41927	92515
No. 5 DB & TSWB TK(P)	4298.8	- 68.90	- 296202	11.78	50661	14285
No. 5 DB & TSWB TK(S)	4298.8	- 68.90	- 296202	11.78	50661	14285
F. P. TK(C)	4283.2	122.42	524348	10.59	45356	12416
A. P. TK(C)	985.3	-124.65	- 122823	15.56	15330	8896
No. 2 DB & TSWB TK(P)	2490.0	69.05	171929	1.52	3795	220
No. 2 DB & TSWB TK(S)	2490.0	69.05	171929	1.52	3795	220
No. 3 DB & TSWB TK(P)	0.0	22.07	0	0.51	0	30183
No. 3 DB & TSWB TK(S)	0.0	22.07	0	0.51	0	30183
DEADWEIGHT	93581.5	11.37	1064045	9.26	866584	217993
LIGHT SHIP WEIGHT	17739.0	- 6.53	- 115836	15.64	277438	
DISPLACEMENT	111320.5	8.52	948450	10.28	1144374	217993

【부록8】 Normal Ballast loaded condition of bulk carrier



DEADWEIGHT ITEMS	WEIGHT (MT)	L. C. G FROM L/2 (M)	MOMENT ABOUT L/2 (MT-M)	V. C. G FROM BL (M)	MOMENT ABOUT BL (MT-M)	FREE SURFACE MOMENT (MT-M)
BUNKERING CONDITION	5154.2	- 70.61	- 363938	11.48	59170	14792
No.1 DB & TSWB TK(C)	4518.0	104.20	470753	9.28	41927	0
No.2 DB & TSWB TK(P)	4912.5	69.54	341609	10.32	50682	0
No.2 DB & TSWB TK(S)	4912.5	69.54	341609	10.32	50682	0
No.3 DB & TSWB TK(P)	5010.6	22.66	113546	10.18	50990	0
No.3 DB & TSWB TK(S)	5010.6	22.66	113546	10.18	50990	0
No.4 DB & TSWB TK(P)	3900.8	- 25.95	- 101209	12.71	49573	0
No.4 DB & TSWB TK(S)	3900.8	- 25.95	- 101209	12.71	49573	0
No.5 DB & TSWB TK(P)	4298.8	- 68.90	- 296202	11.78	50661	0
No.5 DB & TSWB TK(S)	4298.8	- 68.90	- 296202	11.78	50661	0
A. P. T TK(C)	985.4	-124.65	- 122824	15.56	15330	0
F. P. T TK(C)	2780.0	122.56	340715	7.31	20317	12416
DEADWEIGHT	49682.9	8.86	440197	10.88	540535	27208
LIGHT SHIP WEIGHT	17739.0	- 6.53	- 115836	15.64	277438	
DISPLACEMENT	67421.9	4.81	324361	12.13	817993	27208